



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

TROMBEHO STĚNA A JEJÍ VYUŽITÍ V TECHNICE PROSTŘEDÍ

TROMBE WALL AND ITS EXPLOITATION IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

LUKÁŠ MED

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

DOC. ING. MICHAL JAROŠ, DR.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Lukáš Med

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Trombeho stěna a její využití v technice prostředí

v anglickém jazyce:

Trombe wall and its exploitation in environmental engineering

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jednou z možností, jak snížit energetickou náročnost budov, je využití prvků tzv. solární architektury. Třebaže jejich základní principy jsou známy už od starověku, častěji jsou aplikovány teprve během posledních dvou až tří desetiletí. Jedním z nich je i tzv. Trombeho stěna, která akumuluje solární zisky a umožňuje jejich využití v době bez slunečního svitu.

Cíle bakalářské práce:

Popište a vysvětlete funkci Trombeho stěny, včetně fyzikálních mechanismů, které přitom probíhají. Proved'te základní provozní měření na realizovaném funkčním vzorku, zpracujte je a vyhodno'te výsledky. Pokuste se odhadnout energetický a ekonomický přínos zařízení za celou otopnou sezónu.

Seznam odborné literatury:

Filleux, Ch., Gütermann, A.: Solární teplovzdušné vytápění. Ostrava: HEL, 2006.

Murtinger, K., Truxa, J.: Solární energie pro váš dům. Brno: ERA group, 2005.

Srdečný, K.: Energeticky soběstačný dům. Brno: ERA group, 2006.

Internetový portál TZB-info (www.tzb-info.cz).

Další internetové, časopisecké a jiné zdroje dle vlastního výběru studenta.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Michal Jaroš, Dr.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 11.11.2012

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Obsahem této bakalářské práce je popis a měření konkrétního vzorku Trombeho stěny na rodinném domě. Teoretická část obsahuje popis různých modifikací Trombeho stěny a nastínění různých způsobů měření teploty. V praktické části je popis měřené Trombeho stěny, zpracování naměřených dat a výpočet celkového energetického a finančního přínosu za měřené období. Výsledky této práce jsou přehledně zpracovány do tabulek a grafů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Trombeho stěna, pasivní solární systém, měření teploty

ABSTRACT

This Bachelor's thesis contains description and measurements of specific Trombe's wall on a family house. Theoretical part consists of different modifications of Trombe's wall and a closer look at different types of temperature measurements. In practical part of this work can be found a description of measured Trombe's wall, a procession of measured data and a calculation of whole energetic and financial contribution of measured period. The results of this work are arranged in graphs and tables.

KEYWORDS

Trombe's wall, passive solar system, temperature measurement

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MED, L. *Trombeho stěna a její využití v technice prostředí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 52 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Michal Jaroš, Dr.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Michala Jaroše, Dr. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 23. května 2013

.....

Lukáš Med

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce doc. Ing. Michalu Jarošovi, Dr. za všestrannou pomoc, připomínky a čas, který mi věnoval, abych mohl tuto práci dokončit.

OBSAH

Úvod	10
1 Solární energie	11
1.1 Energie	11
1.2 Využitelnost solární energie	12
1.3 Nevýhody a výhody solární energie	12
2 Trombeho stěna	14
2.1 Solární systémy a jejich rozdělení	14
2.1.1 Rozdělení pasivních systémů	14
2.2 Historie Trombeho stěny	15
2.3 Klasická Trombeho stěna	15
2.4 Ventilovaná Trombeho stěna	17
2.5 Letní provoz	18
3 Měření teploty	20
3.1 Teplota	20
3.2 Historie teploměrů	20
3.3 Historie teplotní stupnice	20
3.4 Druhy teploměrů	21
3.4.1 Kovové odporové senzory	21
3.4.2 Polovodičové odporové senzory	21
3.4.3 Termoelektrické senzory (termočlánky)	22
4 Měřená Trombeho stěna	23
4.1 Popis Trombeho stěny	23
4.2 Finanční hodnota stěny	25
5 Metodika měření dat	26
5.1 Obecné informace o měření	26
5.2 Popis senzorů	26
5.3 Popis zařízení pro sběr dat	27
6 Analýza naměřených dat	29
6.1 Naměřená data zpracovaná do grafů	29

7	Zhodnocení přínosu Trombeho stěny	33
7.1	Energetické zhodnocení	33
7.1.1	postup výpočtu energetického zhodnocení	33
7.1.2	Výpočet rychlosti výstupního vzduchu	35
7.1.3	Celkový energetický přínos	38
7.2	Ekonomické zhodnocení	41
7.2.1	Elektrická energie	41
7.2.2	Běžně používaná paliva	41
8	Diskuze	43
	Závěr	45
	Seznam příloh	50

ÚVOD

Slunce je primární zdroj energie pro naši planetu, proto je pro lidstvo velmi důležité se naučit tuto energii využívat co nejefektivněji. V současné době existuje mnoho různých způsobů využití této energie, např. fotovoltaické panely, solární kolektory nebo solární elektrárny. Jedním z mnoha takovýchto systémů je i Trombeho stěna.

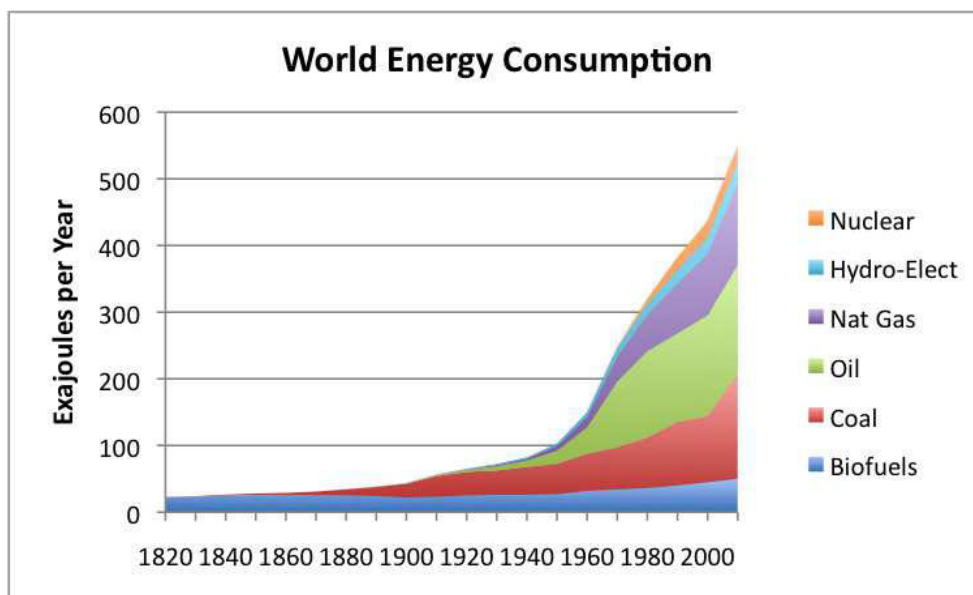
Na našem rodinném domě byla roku 2005 zkonstruována po domácku navržená Trombeho stěna, která má relativně hodně odlišností od klasického provedení, např. zabudovaný ventilátor s termostatem, rozdílnou realizaci absorpční plochy nebo využití transparentního polykarbonátu namísto normálně používaného jednoduchého či dvojitého zasklení. Mnohokrát se v rodině rozvedla debata, zda je tento solární systém užitečný, pokud ano, jak moc, respektive jestli se už původní investice vrátila.

Cílem této práce je zjistit přínos uvedené Trombeho stěny měřením provozních parametrů. Na základě naměřených hodnot je odhadnut její energetický a ekonomický přínos a zhodnocena návratnost původní investice.

1 SOLÁRNÍ ENERGIE

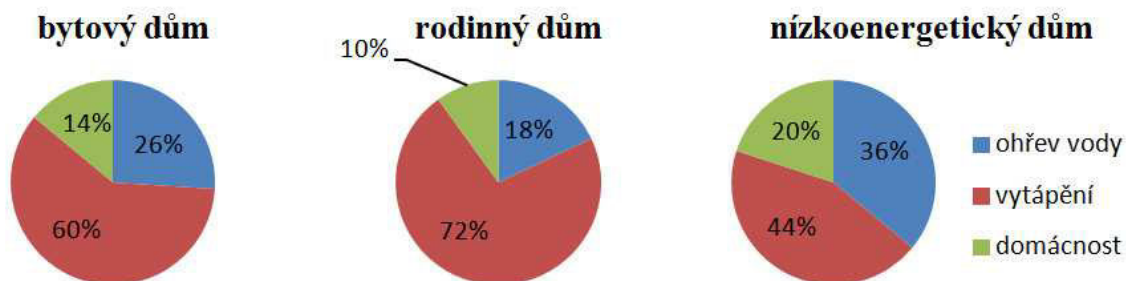
1.1 ENERGIE

Spotřeba energie roste v současné době exponenciálně. Od 80. let vzrostla na téměř dvojnásobek, jak je vidět na obr. 1. Nejvíce je tento trend ovlivněn růstem populace a životní úrovně [1]. Důležité je zaměřit se na tu část snížení spotřeby energie, kterou může jedinec



Obr. 1 Světová spotřeba energie podle zdroje energie [1]

ovlivnit. Především se jedná o energii využívanou ve vlastním domě. Podle [2] 40 až 70 % z celkové energie je využito na vytápění. Toto číslo je ovlivněno typem domu, jak je vidět na obr. 2. Na druhém místě je ohřev vody a teprve potom následuje spotřeba elektrické energie na provoz domácích spotřebičů. Tato energie je i tak z největší části spotřebována na ohřev vody, např. domácí pračkou. Jako jedna z možností úspor se proto nabízí využití solární energie pro přitápění nebo ohřev vody.



Obr. 2 Přibližná struktura spotřeby energie v různých typech domů [2]

1.2 VYUŽITELNOST SOLÁRNÍ ENERGIE

Solární konstanta je výchozím údajem pro využití solární energie. Udává intenzitu slunečního záření na hranici zemské atmosféry (tj. výkon dopadající na jednotku plochy kolmé k paprskům). Její střední hodnota je $1,369 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, ale v průběhu měsíců až let se mění v řádu promile [3]. Jednoduchý solární panel o velikosti 1 m^2 a se současnou účinností 15 %, umístěný na hranici atmosféry, by dosáhl výkonu 200 W [2]. Na povrchu Země je množství dopadajícího solárního záření ovlivněno mnoha faktory. Jedná se o zeměpisnou šířku, roční dobu, klimatické podmínky, orientaci a sklon plochy, na kterou sluneční záření dopadá. Například v tab. 1 jsou vidět rozdíly v naměřeném slunečním záření v Praze a v Seville (Španělsko) v průběhu roku.

Tab. 1 *Průměrná denní energie slunečního záření dopadající v jednotlivých měsících roku v Praze a Seville (Španělsko) na plochu m^2 [4]*

Měsíc	Suma záření na vodorovnou plochu [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{den})$]	
	Praha	Sevilla (ESP)
Leden	0,77	2,47
Únor	1,42	3,10
Březen	2,42	4,61
Duben	3,74	5,29
Květen	4,83	6,78
Červen	4,89	7,30
Červenec	5,06	7,11
Srpen	4,28	6,45
Září	2,86	5,13
Říjen	1,89	3,87
Listopad	0,81	2,51
Prosinec	0,55	2,09
Roční průměr	2,8	4,73

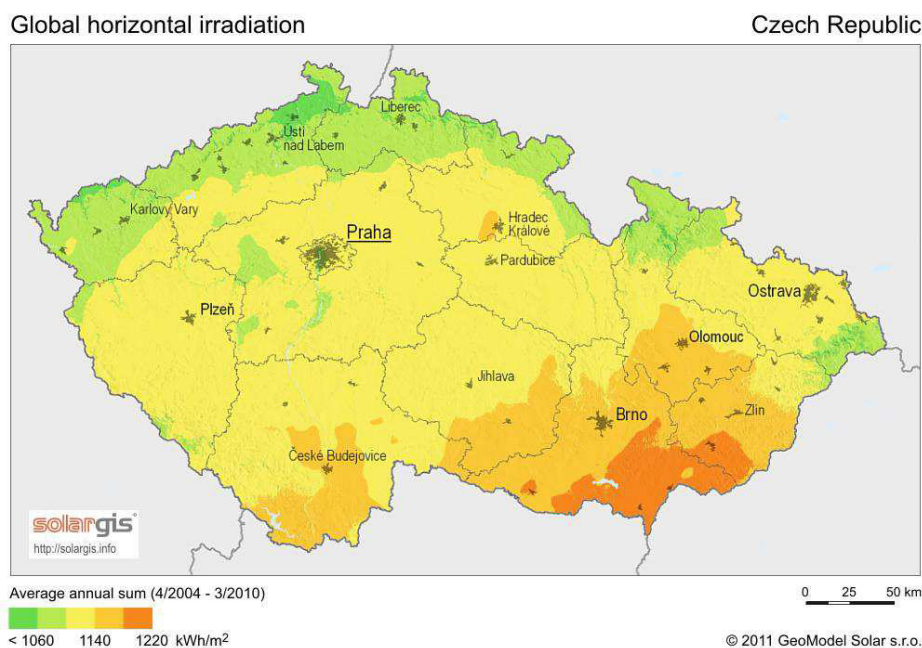
Na obr. 3 jsou znázorněny roční úhrny slunečního záření v ČR. Z tohoto obrázku je patrné, že rozdíly mezi jednotlivými lokalitami nejsou zanedbatelné. Jsou ovlivněny nadmořskou výškou, zeměpisnou šířkou a oblačností [2].

1.3 NEVÝHODY A VÝHODY SOLÁRNÍ ENERGIE

Primární nevýhodou solární energie je časová proměnlivost a malá plošná hustota. Z tohoto důvodu se staví solární systémy poměrně velké a téměř vždy se musí použít další zdroj vytápění, jestliže v momentě potřeby není sluneční záření dostupné. V případě ohřevu teplé vody dle [2] je průměrná účinnost 30 až 40 %, fotovoltaické panely mají účinnost jen něco

málo přes 10 %. Solární systémy jsou vzhledem ke své velikosti a snaze dosáhnout co největší účinnosti poměrně drahé. Na této skutečnosti je závislá i dlouhá doba návratnosti investice. Existuje také velký nepoměr mezi dobou, kdy je možné solární energii využívat, a dobou, kdy teplo ze solární energie potřebujeme.

Univerzální dostupnost je jednou z největších výhod solární energie spolu s tím, že je k dispozici zdarma a z hlediska potřeb lidstva je nevyčerpatelná. V budoucnu se bude určitě častěji přihlížet k minimálním dopadům jejího využívání na životním prostředí. Solární systémy bývají také poměrně technicky jednoduché, robustní, mají dlouhou životnost a minimální nároky na obsluhu. Možnosti jejich instalace nejsou omezené městskou zástavbou, protože každý si může postavit svůj sluneční kolektor na střeše. To je velký rozdíl například od vodních či větrných elektráren. Fotovoltaické elektrárny jsou současné době také podporovány státem, což urychluje návratnost investice. V roce 2013 stát garantuje dvě základní formy podpory: zelený bonus a garantovanou výkupní cenu [4]. Více informací je dostupných z odkazů ve zdrojích.



Obr. 3 Mapa ročních úhrnů celkového slunečního záření dopadající na vodorovnou plochu v ČR [5]

2 TROMBEHO STĚNA

2.1 SOLÁRNÍ SYSTÉMY A JEJICH ROZDĚLENÍ

Solární systémy jsou zařízení, která využívají slunečního záření jako zdroje energie. Solární systémy využívající skleníkového efektu dělíme takto:

podle média využívaného k přenosu tepla [2]

- systémy využívající vodu nebo nemrznoucí směs - u nás se jedná o nejběžnější systémy. Jejich největší předností je vysoká tepelná kapacita vody, a proto nedosahují tyto systémy takových rozměrů.
- systémy využívající vzduch - výhodou v tomto případě je jednoduchá konstrukce, ale vzhledem k nízké tepelné kapacitě vzduchu je nutné stavět rozvodná potrubí většího průměru.

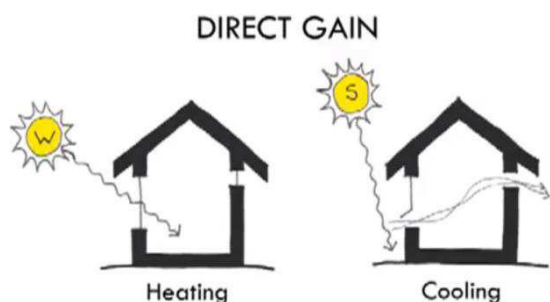
podle způsobu přenosu tepla a komplexnosti zařízení [2]

- systémy aktivní - přenos tepla těchto systémů je uskutečněn pomocí čerpadel nebo ventilátorů ve spojení s vhodným regulačním zařízením. Jsou tedy technicky složitější než pasivní systémy, lépe se regulují a dosahují větší účinnosti. Musí se ovšem počítat s většími náklady na stavbu.
- systémy pasivní - přesun energie je zajištěn samovolně, to znamená bez pomoci technických zařízení. Přitom se uplatňují všechny způsoby přenosu tepla: konvekce, kondukce a radiace. Architektonické dispozice a konstrukční koncepce musí umožnit vzduchu proudit, protože největší část přenosu tepla probíhá skrze konvekci. Vznikem teplotního gradientu mezi jižní(osvícenou) stranou domu a severní (neosvícenou) dochází k proudění vzduchu. Málo známý je fakt, že pasivní solární systém nemusíme využívat pouze k přitápění, ale například i k větrání či ochlazování, jak je dále vidět na obr. 4-7 [6].

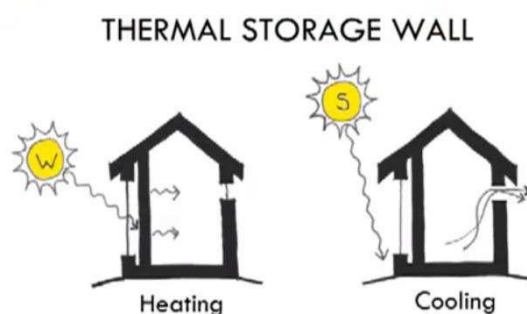
2.1.1 ROZDĚLENÍ PASIVNÍCH SYSTÉMŮ

Pasivní systémy podle způsobu využití energie dělíme takto [7]:

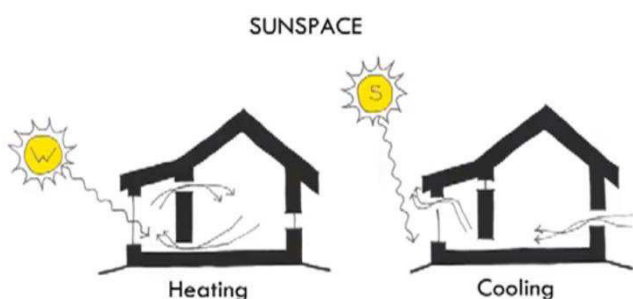
- a) přímé (záření proniká do místnosti přes zasklení - obr. 4)
- b) nepřímé (do místnosti se dostává energie ve formě tepla vyzařovaného ze stěny obr. 5)
- c) izolované (teplo se dostává do místnosti pomocí proudění ze speciálně upravené části domu obr. 6 nebo odlehlého kolektoru obr. 7)



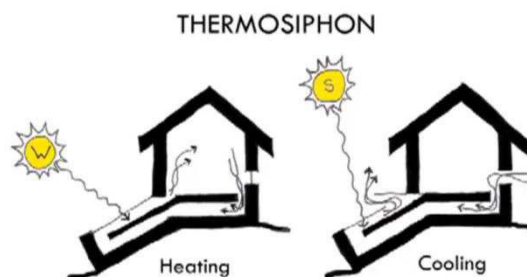
Obr. 4 Solární systém s přímým ziskem v letním a zimním období [7]



Obr. 5 Solární systém s nepřímým ziskem (termální stěna) v letním a zimním období [7]



Obr. 6 Zimní zahrad v letním a zimním období [7]



Obr. 7 Termosifon v zimním a letním období [7]

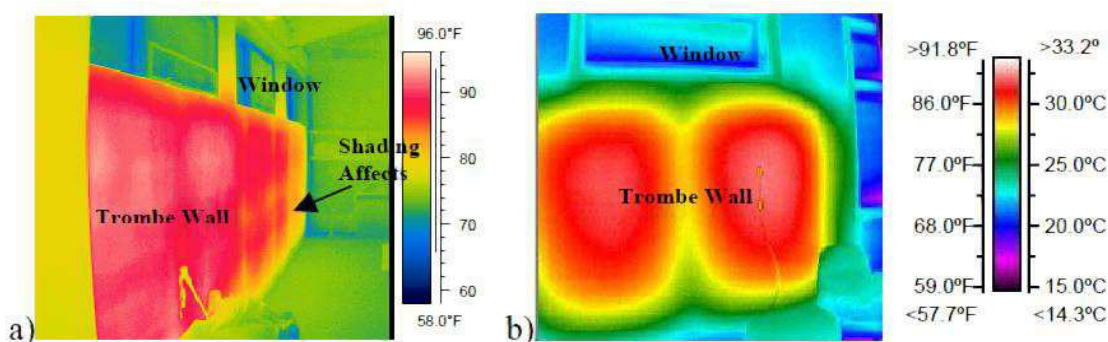
2.2 HISTORIE TROMBEHO STĚNY

Poprvé Trombeho stěnu navrhl a patentoval v roce 1881 Edward Morse z USA. Svého prvního reálného využití a zpopularizování se však dočkala téměř o sto let později (1964), kdy Felix Trombe a Jaques Michel zkonstruovali Trombeho stěnu během projektu „Solární pasivní dům“. Proto se dnes tento solární systém označuje jako Trombeho stěna nebo též francouzská stěna. Trombeho stěna zde sice fungovala pouze jako zeď natřená černou glazurou naprosto bez izolace, ale ukázala tak základní princip a výhody tohoto solárního systému, který se využívá dodnes [8]. Ve Francii se tento nový stavební prvek stal velmi populární. Díky novým materiálům (sklo, nátěry, stavební materiály) se stále více zlepšovala účinnost a využitelnost. Západní Evropa není jediná, kde můžeme dnes najít Trombeho stěnu. V USA, Číně, Indii a dalších zemích se využívá převážně na veřejné budovy, školy nebo administrativní budovy [8].

2.3 KLASICKÁ TROMBEHO STĚNA

Trombeho stěna spadá do kategorie pasivních solárních systému s nepřímým ziskem. Za dobu od její první realizace na světě vzniklo mnoho modifikací, které ji mohou zařadit například

i do kategorie aktivních solárních systémů. První provedení Trombeho stěny nevyužívalo skleníkového efektu a bylo bez zasklení. Dnes se tato konstrukce nevyužívá a byla nahrazena zasklenou variantou. Typická neodvětrávaná Trombeho stěna se skládá z 10 - 40 centimetrů silné, jižně orientované zděné zdi s černě natřeným materiálem na vnějším povrchu a z jednoduchého nebo dvojitého zasklení. Sklo je umístěno 5 až 15 centimetrů od zdi, aby byla vytvořena malá vzduchová mezera [9]. Sluneční radiace prochází skrze sklo a je absorbována stěnou s tmavým povrchem s vysokou pohltivostí a velmi nízkou emisivitou, což umožňuje stěně absorbovat solární radiaci a zabraňuje jí emitovat zpět ve formě dlouhovlnného záření [10]. Teplo, které je uloženo do materiálu, kondukcí pomalu proniká do vnitřních částí stěny. Ve večerních hodinách dochází k radiaci nashromážděného tepla do prostoru. Podle publikace [6] hloubka místnosti za stěnou by neměla být větší než 10 metrů, aby prohřátí bylo patrné v celé půdorysné ploše přitápěného prostoru. Dvaceticentimetrovou stěnou z plných cihel pronikne naakumulované teplo za 8 až 10 hodin do interiéru budovy [11]. To znamená, že obytný prostor je postupně prohříván i několik hodin po západu slunce. Toto se projeví snížením topných nákladů na vytápění domu v čase, kdy je to více žádoucí. Tento jev je vidět na obr. 8, kde jsou zachyceny dvě různé Trombeho stěny ve večerních hodinách. Pokoje vyhřívané Trombeho stěnou jsou považovány za více komfortní kvůli přirozenějšímu vytápění než místnosti vytápěné nuceným prouděním vzduchu [9].

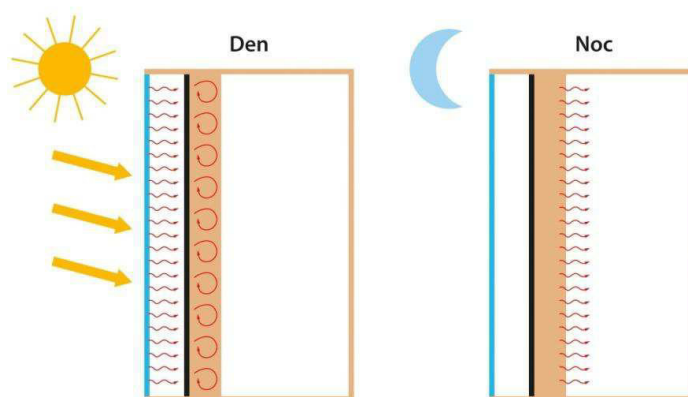


Obr. 8 Infračervené snímky a) Zion Trombeho stěny 16. prosince ve 20:30 b) NREL SEB Trombeho stěny 21. ledna ve 20:00 [11]

Volba materiálu průsvitné části Trombeho stěny může velmi ovlivnit účinnost celého systému. Tento materiál by měl být co nejvíce propustný pro sluneční záření a zároveň by měl redukovat tepelné ztráty lícni plochy Trombeho stěny. Nejčastěji se používá čiré sklo nebo tvrzené sklo s nízkým obsahem oxidu železa, které má vyšší propustnost [12]. Je možné také využít zakrytí z polykarbonátových desek a akrylovým povlakem s vysokou odolností před ultrafialovým zářením [12].

Dalšího zvýšení efektivity se dá dosáhnout použitím selektivního povlaku na povrchu vnější stěny. Tímto se zabrání zpětnému vyzařování infračerveného záření zpět skrze zasklení stěny. Tato vrstva se skládá z tenkého kovového povlaku, který absorbuje téměř všechnu

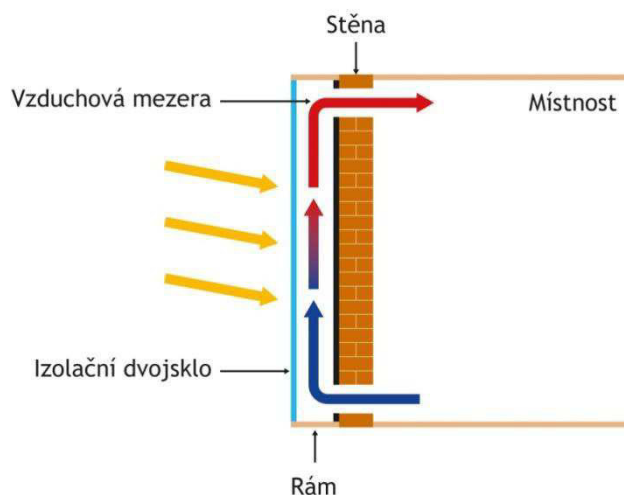
radiaci ve viditelné části solárního spektra a emituje velmi málo v infračerveném rozsahu [11].



Obr. 9 Funkce Trombeho stěny ve dne a v noci [13]

2.4 VENTILOVANÁ TROMBEHO STĚNA

Dalším typem Trombeho stěny je takzvaná ventilovaná stěna (obr. 10). Do stěny se instalují dva otvory, jeden v dolní části a druhý v horní části. Proces předání tepla probíhá následovně. V okamžiku, kdy se solární radiace přemění na teplo, je část tepla odevzdána stěně a zbytek je zachycen v mezeře mezi sklem a stěnou. Podle druhého zákona termodynamiky je teplo použito na ohřátí chladnějšího vzduchu v mezeře a teplý vzduch stoupá vzhůru. V tento moment prochází otvorem v horní části stěny a proudí do místnosti, což má za následek vznik podtlaku v prostoru mezi stěnou a sklem. Pod zasklením je spodním otvorem nasáván chladnější vzduch z místnosti, ten se opětovně ohřívá a cirkuluje mezi místností a Trombeho stěnou. Přestup tepla v tomto systému je uskutečněn přes tři různé mechanismy: tepelnou radiaci, kondukcí a konvekcí, z nichž radiace je ta nejdůležitější [9].



Obr. 10 Ventilovaná Trombeho stěna [13]

U prototypů Trombeho stěn firmy Odeillo byl naměřen tento procentuální přenos tepla [9]:

Konvekce	28 %
Radiace	54 %
Kondukce	18 %

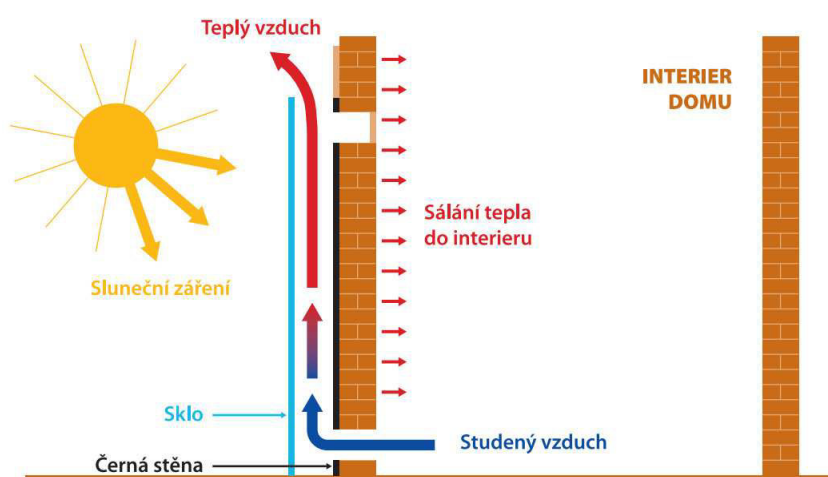
Průměrná účinnost těchto Trombeho stěn v období mezi listopadem dubnem se pohybovala přibližně okolo 30 % [9].

Trombeho stěnu je možné opatřit ventilátorem nebo ventilátory ve ventilačních otvorech s vhodnou regulací. Tím je možné dosáhnout lepší účinnosti. Takto realizovaná Trombeho stěna může být zařazena do kategorie aktivních solárních systémů.

2.5 LETNÍ PROVOZ

Většina pasivních solárních systémů může být deaktivována během léta nebo upravena tak, aby klimatizovala. Jsou čtyři hlavní způsoby, jak toho dosáhnout:

- 1) Zakrytím stěny reflexní folií, která odráží sluneční záření a zabraňuje téměř veškerému ukládání tepla do zdi [9].
- 2) Vytvořením proudění vzduchu, které bude způsobeno otevřením přídavného horního otvoru na venkovní části Trombeho stěny, viz obr. 11, a dolního otvoru ve stěně domu. Tímto dojde ke vzniku takzvaného „solárního komínu“. Vzduch z dolní části místnosti je nasáván do vzduchové mezery, kde se zahřívá a opouští kolektor [13].

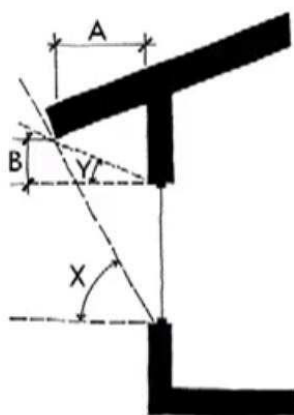


Obr. 11 Solární komín [14]

3) Pomocí solárního zastínění, které je znázorněno na obr. 12, je možné zastínit Trombeho stěnu před vysokým letním sluncem. Existuje jednoduchý výpočet, jak určit velikost zastínění, aby bylo dosaženo maximální efektivity v závislosti na zeměpisném umístění aplikované Trombeho stěny [9].

Výpočet probíhá následovně. Podle obr. 12 je úhel X roven zeměpisné šířce umístění domu plus 20° . Úhel Y odpovídá úhlu slunce během zimního slunovratu. Například dům v Memphis v Tennessee umístěný na zeměpisné šířce 35° severně by měl mít úhel X roven 55° a úhel Y by měl být podle úhlu slunce ve slunovratu minimálně 31° [7].

SOLAR SHADE SIZING



Obr. 12 Výpočet solárního zastínění [7]

4) Pomocí listnatých stromů lze v létě zmírnit dopad slunečních paprsků na Trombeho stěnu, a tím zabránit přehřívání. Nicméně se tento postup nedoporučuje, přestože v zimě stromy opadávají, stále určitou svou částí zakrývají stěnu, a tím snižují velmi potřebný zimní výkon [7].

3 MĚŘENÍ TEPLOTY

3.1 TEPLOTA

Teplota je stavová veličina charakterizující termodynamický stav jakékoliv makroskopické soustavy. Teplota je zahrnuta do soustavy jednotek SI s jednotkou kelvin a vedlejší jednotkou stupeň Celsia, která je z ní odvozená. Jako jednu z mála veličin ji nelze měřit přímo, a proto se využívá jiných fyzikálních veličin, např. změny elektrického odporu kovů či polovodičů, objemové nebo délkové teplotní roztažnosti látek nebo vzniku kontaktního napětí [15].

3.2 HISTORIE TEPLOMĚRŮ

V minulosti byla teplota určována podle lidských pocitů hmatu nebo zraku, např. změna barvy kovů při zahřátí. Jako první využil tepelné roztažnosti vzduchu k měření teploty profesor univerzity v Padově v Itálii Galileo Galilei na začátku 17. století. Jako první sestrojil velmi jednoduchý teploměr, pojmenovaný „vzduchový teploměr“. Jednalo se o velmi nedokonalý přístroj. Posloužil jako odrazový můstek k rozvoji dalších měřících zařízení. První teploměr, který používal jako teploměrnou látku kapalinu, sestrojil pravděpodobně roku 1631 francouzský lékař Jean Rey. Jako teploměrná látka byla použita voda. Nevýhodou vody byla velice malá roztažnost, a proto netrvalo dlouho a jako výhodnější teploměrné látky se ukázaly líh a rtuť. Toskánský velkovévoda Ferdinand II. zkonstruoval první lihový teploměr roku 1641. Tento teploměr umožňoval měřit teplotu ve větším rozsahu než teploměr vodní. Za důležitý mezník ve vývoji teploměrů je považován rok 1866, kdy sir Thomas Clifford Allbutt vynalezl první lékařský teploměr, který byl velmi podobný tomu, jak teploměr známe dnes. Všechny tyto teploměry se nazývají dilatační, neboť jsou založeny na principu tepelné roztažnosti látek. Později bylo využito i jiných fyzikálních principů a vznikly teploměry odporové, polovodičové nebo termoelektrické. Mezi nejnovější teploměry patří tzv. infrateploměry, které měří teplotu bezdotykově pomocí emitovaného infračerveného záření tělesa do okolí [16].

3.3 HISTORIE TEPLOTNÍ STUPNICE

S přibývajícím druhem teploměrů vyvstal problém, který dlouhá léta zůstal nevyřešen. K určení a vymezení teplotní stupnice jsou zapotřebí dva pevné body. Na těchto bodech se vědci nedokázali dohodnout. Jako první navrhl padovský profesor Renaldini použití teploty varu vody a tání ledu roku 1694. Jeho myšlenka nebyla akceptována. Každý konstruktér teploměrů si vytvářel vlastní stupnice. S rozvojem fyzikálních věd vyvstala nutnost spolehlivě měřit a porovnávat teploty. Gabriel Daniel Fahrenheit byl první fyzik, jehož způsob měření nejvíce splňoval tento požadavek. Roku 1724 zavedl novou teplotní stupnici, která dodnes nese jeho jméno a která se začala používat zejména v Anglii, USA a dalších anglosaských zemích. Fahrenheit si jako své dva pevné body vybral teplotu lidského těla, kterou označil jako 100 °F, a za nulovou hodnotu zvolil právě teplotu směsi ledu a soli, která má přibližně

teplotu $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zajímavostí je, že ačkoli se řídil teplotou lidského těla, vybral si pravděpodobně nějakého zvláštního jedince, protože teplota normálního lidského organismu podle jeho stupnice je $98\text{ }^{\circ}\text{F}$ [16]. Švédský přírodovědec Anders Celsius založil další stupnici v roce 1742. Na rozdíl od Fahrenheita si zvolil teplotu varu vody jako $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a teplotu tání ledu jako $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Během několika dalších let se jeho kolegové, botanik Carl Linné a M. Strömör, rozhodli stupnici obrátit, proto dnes je teplota varu vody $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tání ledu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Další stupnicí, která vznikla pouze šest let po vytvoření Fahrenheitovy stupnice, byla Réaumurova stupnice. Dnes se sice už téměř nepoužívá, ale svého času byla velmi rozšířená a její používání se udrželo až do 20. století. Nula zde byla definována jako bod tání ledu a přírůstek jednoho stupně odpovídá zvětšení objemu 80% lihu v lihovém teploměru o 1/1000. Poslední a v současnosti jednou z nejvyužívanějších stupnic je Kelvinova stupnice. Roku 1848 lord Kelvin (William Thomson) napsal vědeckou práci *On an Absolute Thermometric Scale*, ve které poukázal na nutnost nastavení absolutní nulové hodnoty na stupnici a vypočítal, že se jedná o teplotu přibližně $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ [16].

3.4 DRUHY TEPLOMĚRŮ

Kapitola 4.1 pojednávala o historii teploměrů a byl v ní přiblížen dilatační druh teploměru, který je závislý na teplotní roztažnosti látek. Tyto teploměry se používají běžně a setkáváme se s nimi velice často. Další kapitola se zaměří na dotykové teploměry, které se využívají především v průmyslu.

3.4.1 KOVOVÉ ODPOROVÉ SENZORY

U těchto teploměrů se využívá teplotní závislosti elektrického odporu kovů. Kovy mají krystalickou mřížku skládající se z atomů, okolo kterých se chaoticky pohybují elektrony. Atomy, které kmitají okolo svých uzlových bodů v mřížce, s rostoucí teplotou zvyšují amplitudu svého pohybu. Elektrony hůře procházejí skrze mřížku a elektrický odpor roste [18]. Tyto teploměry mají následující výhody: vysoké přesnosti pro nízké a střední teploty, vysoké úrovně výstupních signálů, dálkové měření. S tím souvisí i nevýhody, jako např. vysoká pořizovací cena, nižší odolnost proti vibracím a nutnost externího napájení. Nejčastěji používaným materiálem k měření, jak technickým nebo laboratorním, je platina, která má nejvyšší rozsah (-20 až $850\text{ }^{\circ}\text{C}$) a je také nejpresnější [18].

3.4.2 POLOVODIČOVÉ ODPOROVÉ SENZORY

Stejně jako kovové odporové senzory i polovodičové odporové senzory pracují na principu teplotní závislosti odporu.

TERMISTORY

Skládají se z polovodičových feroelektrických keramických materiálů. Vysoká teplotní citlivost, menší rozměry, možnost přímého měření na velké vzdálenosti a jednoduchý převod

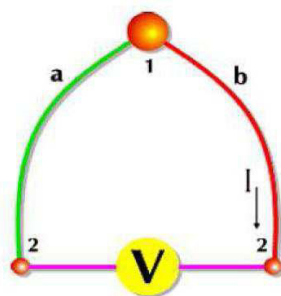
odporu na elektrické napětí jsou hlavními výhodami těchto senzorů. Naopak nevýhodou je nelineární charakteristika. V závislosti na použitém materiálu dělíme termistory na negastory (velký záporný součinitel odporu) nebo pozistory (velký kladný součinitel odporu). Pro negastory s rostoucí teplotou odpor klesá a pro pozistory s rostoucí teplotou odpor stoupá. V praxi se používají hlavně negastory [18].

MONOKRYSTALICKÉ SENZORY

Polovodičové monokrystalické senzory teploty se vyrábějí z křemíku, germania nebo india. Nejčastěji se však můžeme setkat s křemíkovými senzory, které jsou díky dlouhodobé stabilitě a nepříliš velké nelinearitě vhodné k měření běžných teplot jako náhrada finančně náročnějších platinových senzorů. Vzhledem k vlastnostem křemíku se tyto senzory používají pro měření teplot maximálně do 125 až 175 °C [19].

3.4.3 TERMoeLEKTRICKÉ SENZORY (TERMOČLÁNKY)

Termočlánek je nejčastěji používaný jako teplotní senzor, přestože se jedná o zdroj elektrického proudu. K používání termočlánu jako zdroje brání jeho nízký výkon a energetická účinnost. Termočlány využívají Seebeckova jevu. Pokud jsou spojeny dva kovy a, b dle obr. 13 k sobě na dvou různých místech (bod 1 a 2 na obr. 13), vzniká uzavřený obvod. Jestliže má každý tento spoj rozdílnou teplotu, generuje se napětí, které je úměrné teplotě. Měření teploty pomocí termočlánu je založeno právě na měření tohoto napětí a jeho změny [20].



Obr. 13 Měřicí obvod termočlánu, dva různé kovy (a,b), dva spoje (1,2) [20]

Podle dané situace vyžadujeme určité parametry termočlánu, např. teplotní rozsah, co nejvyšší hodnotu termoelektrického napětí (vyžaduje méně citlivý přístroj), odolnost proti korozi, chemickým či mechanickým vlivům, přibližně lineární průběh závislosti termoelektrického napětí na teplotě. V minulosti se používalo velké množství termočlánu, ale dnes se již používají termočlány pouze podle evropské normy CEI 584.1, protože dokážou pokrýt všechny požadavky [21]. Termočlány jsou nejvíce využívané senzory teploty vzhledem k nízké ceně, širokému teplotnímu rozsahu a široké využitelnosti. Naopak jejich nevýhodou je nelinearita teplotní charakteristiky, stárnutí materiálu v místě spoje a malá citlivost.

4 MĚŘENÁ TROMBEHO STĚNA

Trombeho stěna, která je vidět na obr. 14, byla na dům instalována v srpnu roku 2005. Byla zhotovena svépomocí obyvateli domu. Dům byl postaven v 30. letech minulého století a při jeho stavbě nebyl brán zřetel na jakékoliv pasivní vytápění. Nicméně rozmístění obytných prostor, jejich orientace na jih a použití klasických pálených cihel předurčuje možnost instalace Trombeho stěny.

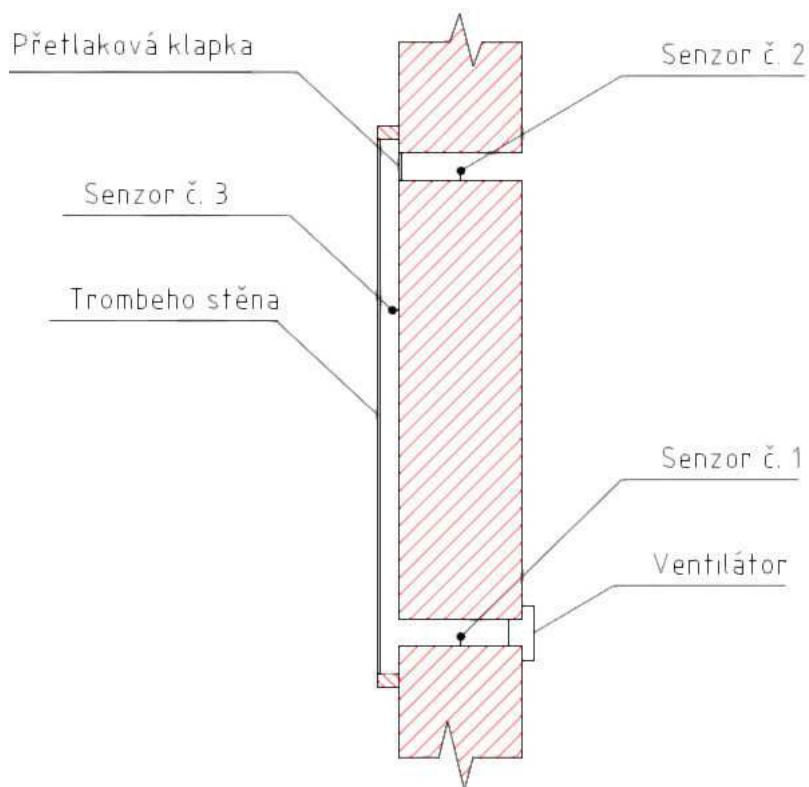


Obr. 14 Měřená Trombeho stěna na rodinném domě

4.1 POPIS TROMBEHO STĚNY

Stěna je umístěna na jižní stěně domu a se svými rozměry 2,15x2,06 m zabírá plochu zhruba 4,45 m². Na lící straně Trombeho stěny je použita čirá transparentní jednokomůrková polykarbonátová deska (tloušťka 10 mm) ve dřevěném rámu, vzdálená 80 mm od stěny. Deska zaručuje vznik skleníkové efektu. Tento druh zasklení byl zvolen z důvodů odlehčení konstrukce a snadnější manipulace se stěnou, kterou lze během letního období sejmout z rodinného domu, aby nedocházelo k přehřívání obytných prostor. Absorpční plocha se skládá ze sedmi pozinkovaných plechů o velikosti 210x2060x0,8 mm, natřených matnou černou barvou Eternal. Plechy jsou umístěny zhruba v půli vzduchové mezery a jsou rozmístěny cca 50 mm od sebe a rámu. Na rozdíl od klasického provedení Trombeho stěny je to atypické řešení. Jak již bylo zmíněno výše, standardně bývá natřena stěna černou barvou.

Toto řešení připomíná klasický sluneční vzduchový kolektor, kde mohou být absorbéry umístěny uprostřed vzduchové mezery pro co nejrychlejší ohřev vzduchu. Na rozdíl od vzduchového kolektoru není tepelně izolována zadní stěna, která je v tomto případě tvořena akumulací hmotou (zdivem). U tohoto typu Trombeho stěny je upřednostněn přenos tepla konvekcí, kondukce skrze stěnu je přiměřeně redukována.



Obr. 15 Řez měřenou Trombeho stěnou s umístěním senzorů

Protože se ve zdi nacházejí dva otvory, jedná se o ventilovanou Trombeho stěnu. Otvory s průměrem 100 mm o velikosti přibližně 79 cm² je zajištěno proudění vzduchu, které umožňuje konvekci. Jeden otvor je umístěn v dolní části stěny, aby nasával chladnější vzduch u podlahy místnosti. V tomto otvoru na vnitřní stěně domu je umístěn axiální ventilátor SIKU 100 AZ, který je ovládán termostatem ELKO TER-3B s čidlem uprostřed stěny s nastavenou hysterezí 2 °C. Ventilátor zajišťuje primárně zvýšenou konvekci vzduchu a sekundárně automaticky ovládá otevření a uzavření dolního sacího otvoru. U horního okraje stěny je umístěn druhý otvor, který je uzavřen přetlakovou klapkou na venkovní straně stěny. Pokud termostat vyhodnotí, že teplota ve vzduchové mezeře přesáhla nastavenou hodnotu 33 °C, spustí se ventilátor, otevře žaluzii v dolním otvoru, v mezeře nastane přetlak, který otevře přetlakovou klapku a horký vzduch proudí horním otvorem do místnosti. Pokud teplota ve vzduchové mezeře klesne pod nastavenou hodnotu, celý solární systém uzavře vstupní a výstupní otvor, čímž zamezí proudění teplého vzduchu do kolektoru a zabrání se ochlazování místnosti.

Absorpční zeď o šířce 45 cm je postavena z plných pálených cihel, které mají vysokou tepelnou kapacitu a umožňují akumulaci tepelné energie do stěny. Tímto je zajištěna primární funkce Trombeho stěny. Fotografie stěny a její detaily viz seznam příloh.

4.2 FINANČNÍ HODNOTA STĚNY

Stěna byla vybudována svépomocí. Pokud se nezapočítá cena za provedenou práci, je přibližná původní investice do tohoto solárního systému následující:

Tab. 2 *Ceny jednotlivých komponentů Trombeho stěny*

Pozinkovaný plech na plochu absorberu o velikosti 2500x1250x0,8 mm a 2500x250x0,8 mm	750 Kč [22]
Nátěr Eternal matný akryl.013 černý 0,7 kg, výrobce Austis	135 Kč [23]
4x Dřevěný hranol na výrobu rámu 80x80x2000 o celkovém objemu 0,0512 m ³	297 Kč [24]
Ventilátor SIKU 100 AZ, P _p =20 W, Q _v =98 m ³ /hod (zastavení prodeje v ČR - cena získána od slovenského prodejce a převedena na koruny s měnovým kurzem 25,93 ke dni 23.4. 2013)	415 Kč [25]
Termostat ELKO TER-3B	1498 Kč [26]
Jistič LSN 6B	57 Kč [27]
Komůrkový polykarbonát Makron, čirý, 10x2100x2000 mm	962 Kč [28]
Celková suma	4 114 Kč

Po započtení ceny konstrukce, šroubů, hmoždinek a ostatních nákladů se cena zaokrouhlí na 4500 Kč.

5 METODIKA MĚŘENÍ DAT

5.1 OBECNÉ INFORMACE O MĚŘENÍ

Měření stěny probíhalo od 25. 2. 2013 do 12. 5. 2013. Původně se do celkového měřicího období měl zahrnout i únor a část ledna, ale vzhledem k problémům s čidly a měřicím zařízením bylo možné s měřením začít až koncem února. V tomto období byl dům normálně využíván k obytným účelům. K měření bylo využito tří čidel a měřicího zařízení, které zaznamenávalo hodnoty senzorů každé tři minuty. Měření probíhalo bez přestávky v celém časovém období. Pouze ve dnech 8., 10., 15., 17. a 22. 4. byl pravidelně od 8.00 do 16.00 hod. vypnut v celé obci proud (údržba elektrických rozvodů). Tato data se využila ke zjištění, jak tento solární systém funguje bez využití elektrické energie.

5.2 POPIS SENZORŮ

Měření bylo vyhodnoceno pomocí tří teplotních čidel. Jednalo se o termočlánky Cu-CuNi (měď-konstantan). V tab. 3 jsou vidět základní parametry. Termočlánky byly spojeny bodově. Tento typ spojení je vhodný pro přesné měření teploty proudu vzduchu nebo malých prvků [29].

Tab. 3 Parametry termočlánku typu T [30]

Kombinace slitin		Tepel. rozsah (°C)	Dovolená chyba	Prostředí ve kterém může termočlánek pracovat
Vodič +	Vodič -	Termočlánky	Standard	
Cu (měď)	Cu-Ni (Konstantan)	-200 až 350	1,0 °C nebo 0,75%	Střední oxid., redukční vakuum nebo inertní. Dobré využití ve vlhkém prostř. Nízké teplot. a kryogenetika.

Senzor č. 1 snímal teplotu na vstupu do Trombeho stěny a byl umístěn za žaluzií a axiálním ventilátorem. Senzor č. 2 měřil teplotu na výstupu a byl umístěn za přetlakovou klapkou ve směru proudění vzduchu. Třetí senzor byl umístěn na vnější straně stěny budovy v horní polovině přímo v blízkosti čidla termostatu a snímal teplotu ve vzduchové mezeře. Čidlo termostatu a senzoru je umístěno za jedním z absorpčních plechů a není ovlivňováno

slunečním zářením. Celkový pohled na stěnu a rozmístění čidel je vidět na obr. 15 v kap. 4.1 a obr. 16. Fotografie detailů umístění senzorů viz seznam příloh.



Obr. 16 Celkový pohled na stěnu a rozmístění teplotních senzorů

5.3 POPIS ZAŘÍZENÍ PRO SBĚR DAT

Záznamy hodnot byly provedeny pomocí přístroje Testo 177-T4 (obr. 17). Jedná se o profesionální datový zapisovač se čtyřmi teplotními vstupy pro současné měření teplot na různých místech. Dokáže uložit až 48 000 různých hodnot, je plně autonomní a baterie má výdrž 5 let. Podle různých druhů konektorů je možné k přístroji připojit termočlánky typu T, K a J [31]. Během měření je možné stahovat a kontrolovat data z přístroje bez přerušení ukládání naměřených hodnot. Import dat do počítače je proveden přes přídatný infraport modul, který je možné k PC připojit přes konektor USB a mini USB. Vzhledem k množství naměřených hodnot bylo nutné data stahovat do PC cca každé tři týdny, aby nedocházelo k zaplnění interní paměti přístroje. Zpracování dat probíhalo ve volně dostupném programu testo Comfort Software Basic 5.0, který zároveň umožňoval konfiguraci přístroje testo 177-T4. Slouží primárně k ukládání, načítání a vyhodnocování jednotlivých naměřených hodnot. Tento program je kompatibilní se systémem Windows 7 a je možné v něm jednoduchým způsobem zpracovat data do grafů. Vzhledem k nedostatku uživatelské optimalizace byl ke

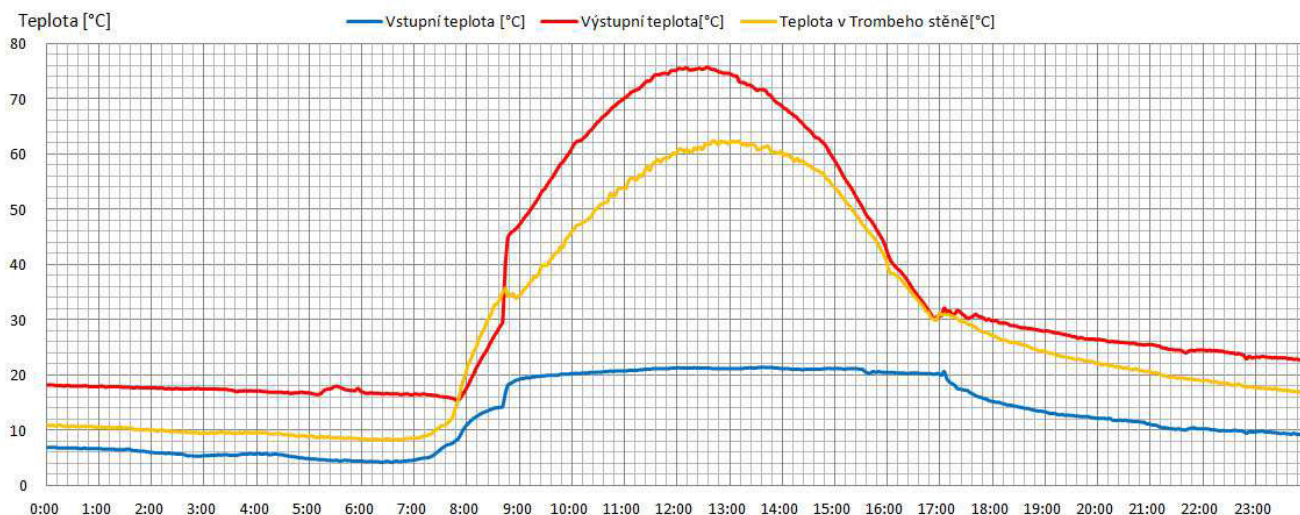
grafickému zpracování dat využít software Microsoft Excel namísto Comfort Software Basic 5.0.



Obr. 17 Testo 177-T4 s přídavným infraport modulem (v horní části)
a s konektory termočlánků (v dolní části)

6 ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT

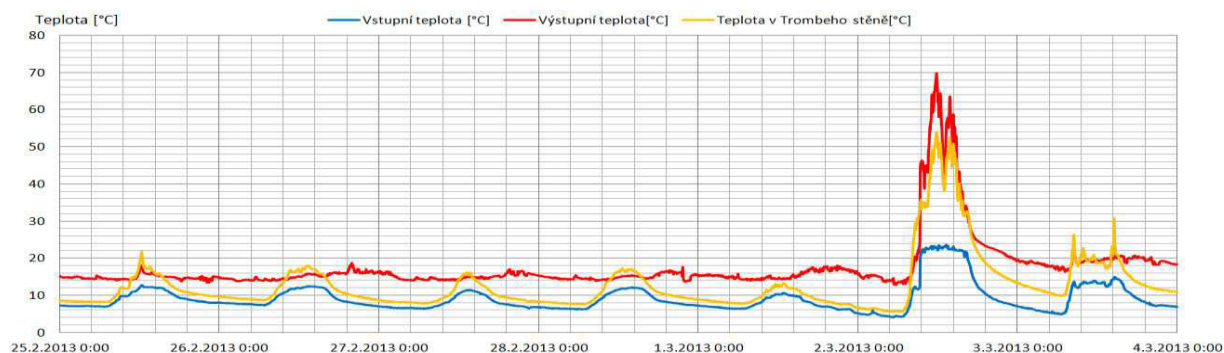
Výstupem měření byly soubory dat z přístroje Testo 177-T4 od začátku měření 25. 2. 2013 do konce 12. 5. 2013. Hodnoty z těchto souborů byly importovány do programu Microsoft Office Excel, kde se dále zpracovávaly do grafů a tabulek. Rozdělením měřeného období po týdnech bylo dosaženo optimální vizuální podoby zpracovaných grafů. Z důvodu snazší orientace v níže uvedených grafech je jako příklad ukázán graf na obr. 18.



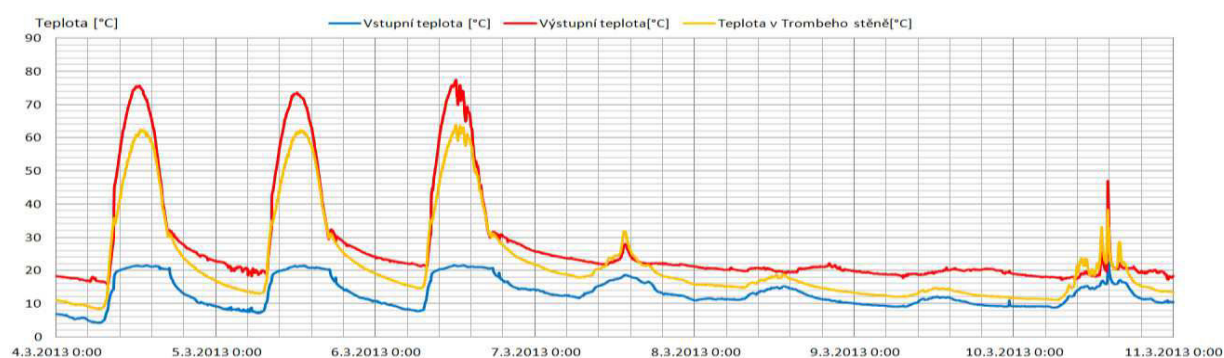
Obr. 18 Graf naměřených hodnot ze dne 4. 3. 2013

Jedná se o den 4. 3. 2013, který byl z hlediska funkce Trombeho stěny optimální. V grafu je znázorněna závislost teploty na třech různých místech v Trombeho stěně (modrá – vstupní teplota, červená – výstupní teplota, žlutá – teplota v Trombeho stěně) na denní době. Z grafu je patrné, že slunce začalo ozařovat stěnu před osmou hodinou ranní. Teplota pod zasklením za necelou hodinu stoupla na 33 °C, což je spouštěcí teplota nastavená na termostatu. Na obr. 19 je vidět téměř kolmý nárůst výstupní teploty v čase 8:44, který je způsoben spuštěním axiálního ventilátoru termostatem, neboť senzor č. 2 je umístěn za přetlakovou klapkou. Postupně teplota na výstupu stoupá až na maximální hodnotu 73,6 °C v čase 12:17. Maximální teploty 62,3 °C pod zasklením na senzoru č. 3 je dosaženo v čase 12:56. Teplota na výstupu klesá až do času 16:59, kdy je vypnut ventilátor (ztráta lineárnosti průběhu teploty v grafu). Senzor č. 3, který je umístěn v blízkosti čidla termostatu, v tento moment naměřil 31,3 °C. Protože je na termostatu nastavená hystereze 2 °C, ventilátor by měl vypínat přibližně při teplotě 31 °C. Z tohoto důvodu je čas vypnutí ventilátoru odečten správně.

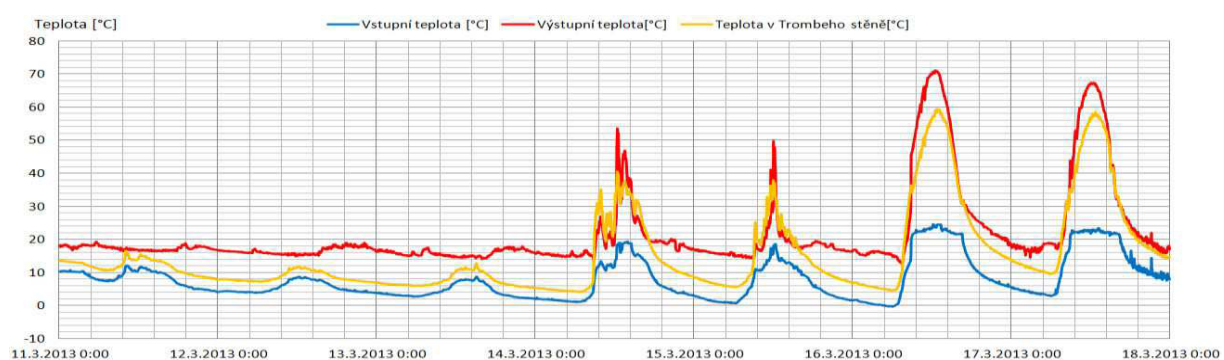
6.1 NAMĚŘENÁ DATA ZPRACOVANÁ DO GRAFŮ



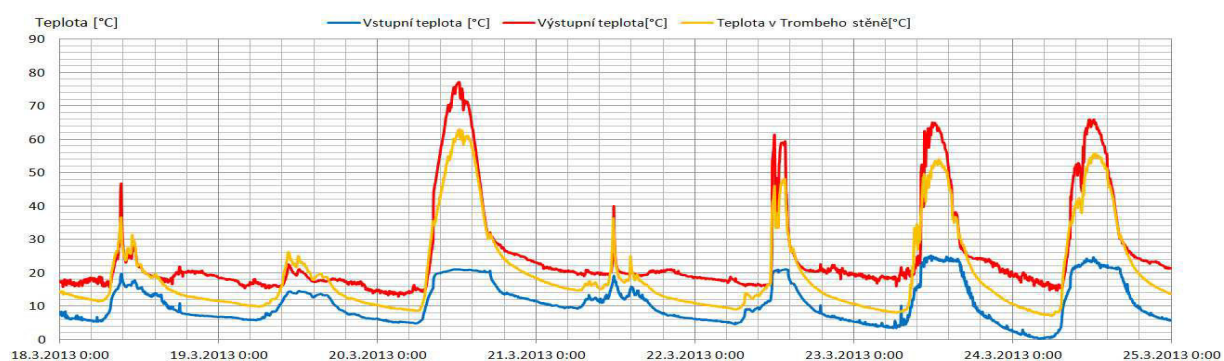
Obr. 19 Graf naměřených hodnot ve dnech 25. 2. –3. 3. 2013



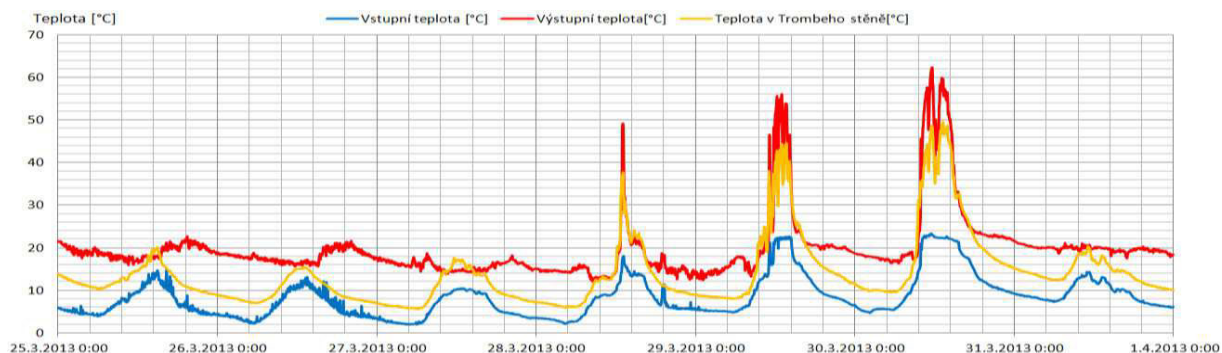
Obr. 20 Graf naměřených hodnot ve dnech 4. –10. 3. 2013



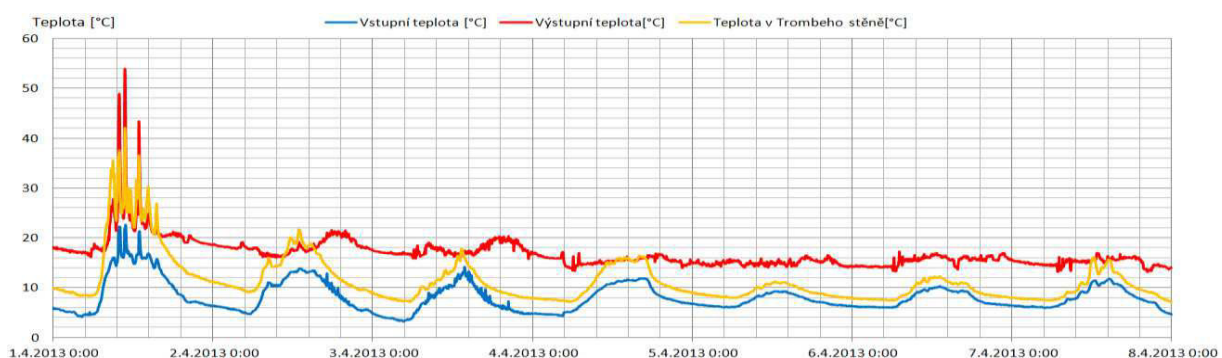
Obr. 21 Graf naměřených hodnot ve dnech 11. –17. 3. 2013



Obr. 22 Graf naměřených hodnot ve dnech 18. –24. 3. 2013

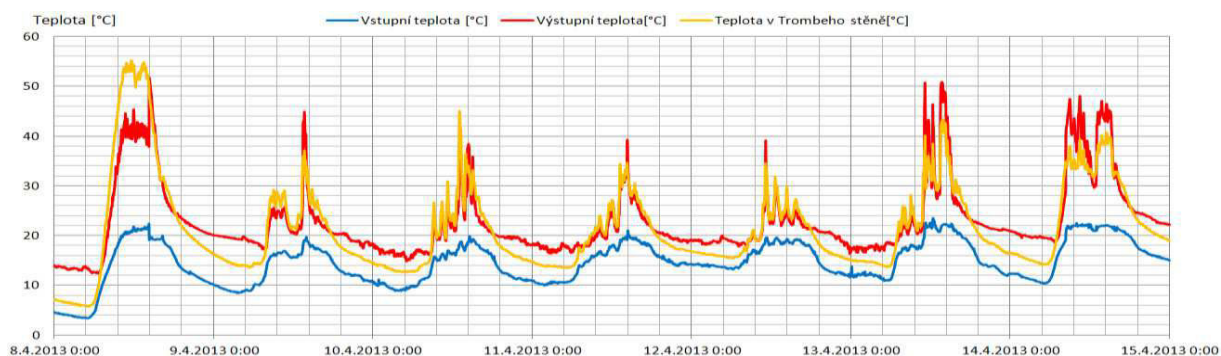


Obr. 23 Graf naměřených hodnot ve dnech 25. –31. 3. 2013

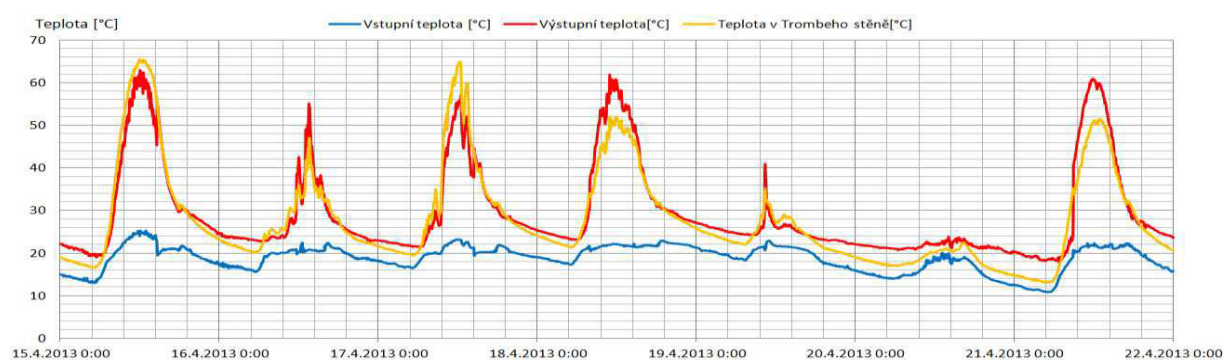


Obr. 24 Graf naměřených hodnot ve dnech 1. –7. 4. 2013

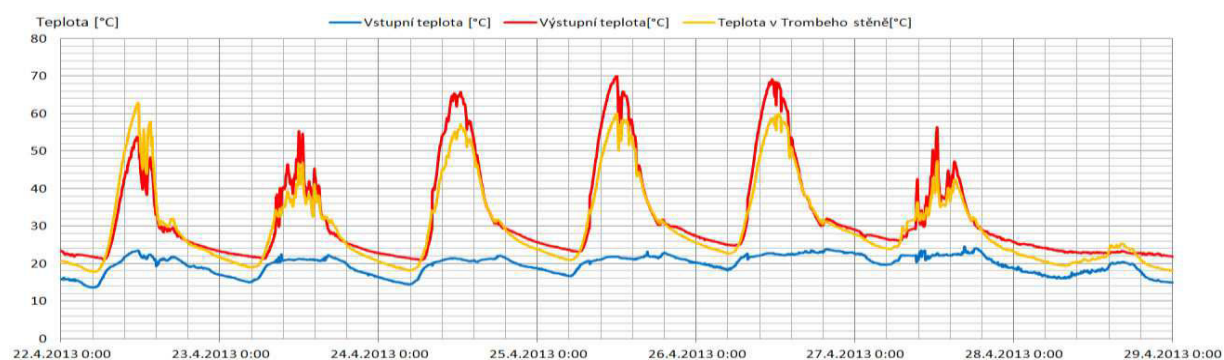
Ve dnech 8., 10., 15., 17. a 22. 4. byla v čase 8.00-16.00 hod. v obci vypnuta dodávka elektrického proud z důvodu opravy a údržby rozvodné sítě. Tato skutečnost se v grafech projevila vyšší teplotou v Trombeho stěně na senzoru č. 3 a nižší teplotou na výstupu z ní. V této době nedošlo k sepnutí ventilátoru. Nicméně z obr. 25, 26 a 27 je patrné, že Trombeho stěna fungovala v omezené míře i přes tuto skutečnost, jelikož teploty na výstupu značně převyšují teploty na vstupu. Tento jev je způsoben netěsností žaluzie před axiálním ventilátorem a následným pootevřením přetlakové klapky před senzorem č. 3.



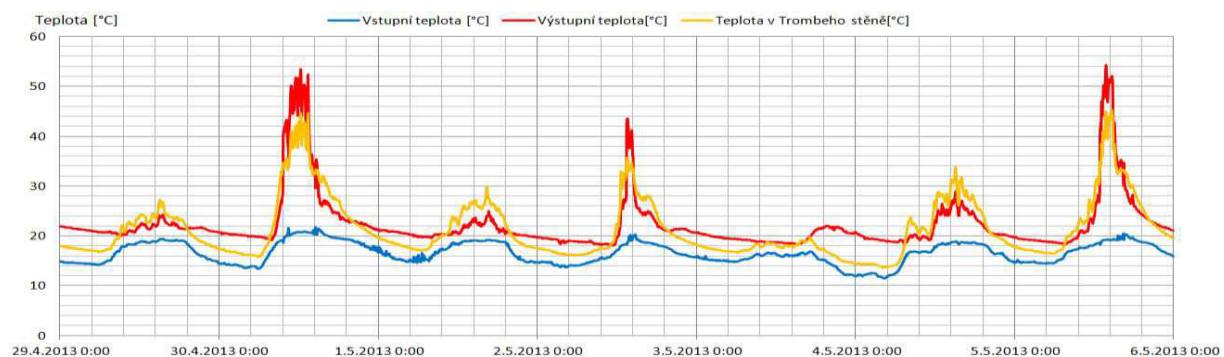
Obr. 25 Graf naměřených hodnot 8. –14. 4. 2013



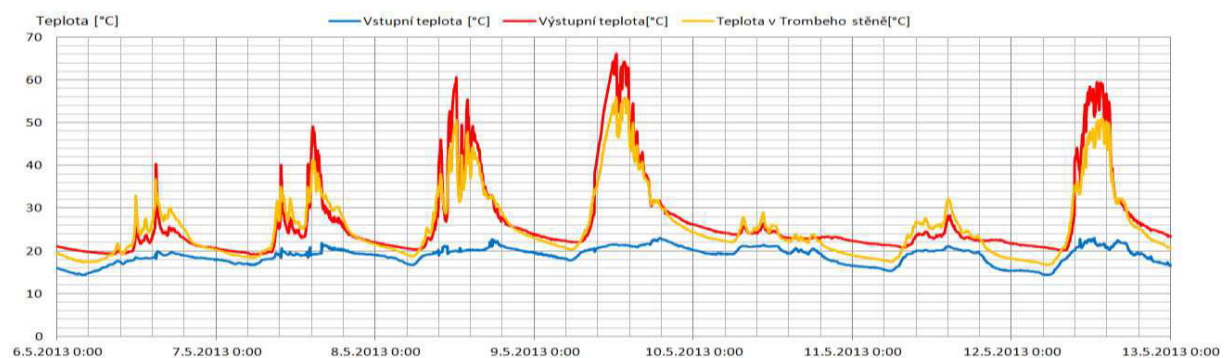
Obr. 26 Graf naměřených hodnot 15. –21. 4. 2013



Obr. 27 Graf naměřených hodnot 22. –28. 4. 2013



Obr. 28 Graf naměřených hodnot 29. 4. –5. 5. 2013



Obr. 29 Graf naměřených hodnot 6. –12. 5. 2013

7 ZHODNOCENÍ PŘÍNOSU TROMBEHO STĚNY

7.1 ENERGETICKÉ ZHODNOCENÍ

7.1.1 POSTUP VÝPOČTU ENERGETICKÉHO ZHODNOCENÍ

Jedním ze způsobů přestupu tepla u této Trombeho stěny je kondukce tepla skrze stěnu a následná radiace do obytného prostoru. S daty získanými měřeními nelze určit tuto část celkového tepelného výkonu stěny. Následující výpočet celkového energetického přínosu je proveden tak, jako by byl tento solární systém vzduchový kolektor.

Cílem tohoto výpočtu je stanovit celkový energetický přínos stěny za měřené období. Celkové teplo Q , které solární systém dodá domu, se vypočte dosazením do (7.1).

$$Q = t \cdot Q_t \text{ [J]} \quad (7.1)$$

Kde:

- Q celkové teplo dodané domu [J]
- t celkový čas Trombeho stěny v provozu [s]
- Q_t tepelný výkon Trombeho stěny [W]

Celkový čas provozu Trombeho stěny se určí dobou, po kterou byl zapnut ventilátor. Každý provozní den se tato doba určí podobně, jako je ukázáno v kap. 6 pod obr. 18, a následným sečtením časů v běhu všech provozních dnů se získá celkový čas Trombeho stěny v provozu t .

Tepelný výkon Trombeho stěny Q_t se dopočítá dosazením do vztahu (7.2) [32]. Příkon ventilátoru P_p je 20 W.

$$Q_t = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta t - P_p \text{ [W]} \quad (7.2)$$

Kde:

- \dot{m} hmotnostní průtok vzduchu výstupem kolektoru [kg/s]
- c_p měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku [J/K·kg]
- Δt rozdíl teplot na vstupu a výstupu z Trombeho stěny [K]
- P_p příkon ventilátoru [W]

Rozdíl teplot Δt se vypočítá ze vztahu (7.3). Pokud se počítá rozdíl teplot, není podstatné, jestli jsou do vztahu dosazovány hodnoty ve stupních Celsia nebo v Kelvinech.

$$\Delta t = t_{out} - t_{in} \text{ [K]} \quad (7.3)$$

Kde:

- t_{in} teplota na vstupu do Trombeho stěny [°C]

t_{out} teplota na výstupu z Trombeho stěny [°C]

Měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku c_p je veličina závislá na teplotě viz tab. 4 [33].

Tab. 4 Hodnoty c_p pro různé teploty za atmosférického tlaku [33]

t [°C]	c_p [J/kgK]
0	1005
20	1005
40	1005
60	1009
80	1009
100	1009

Protože průměrná teplota v celém solárním systému je 33 °C, byla pro všechny výpočty použita konstantní hodnota $c_p = 1005$ [J/K·kg].

Hmotnostní průtok vzduchu ve výstupu z kolektoru \dot{m} se vypočítá dosazením do vztahu (7.4).

$$\dot{m} = Q_v \cdot \rho \quad [\text{kg/s}] \quad (7.4)$$

Kde:

Q_v objemový průtok ve výstupu z kolektoru [m³/s]

ρ hustota vzduchu [kg/m³]

Hustota ρ se vypočítá ze stavové rovnice pro jeden kilogram ideálního plynu (7.5) [32]. Vzduch proudící v Trombeho stěně není ideální plyn, ale tato skutečnost ovlivní celkový výpočet minimálně.

$$p \cdot v = r \cdot T \quad (7.5)$$

Kde:

p tlak [Pa]

v měrný objem [m³/kg]

r měrná plynová konstanta [J/kg·K]

T teplota [K]

Měrný objem v je reciproká hodnota hustoty ρ . Po upravení rovnice (7.5) pro měřenou Trombeho stěnu se získá vztah (7.6) pro výpočet hustoty. Pro usnadnění výpočtu dosazujeme atmosférický tlak s konstantní hodnotou 101325 Pa [34].

$$\rho = \frac{p_n}{r_{vz} \cdot T_{out}} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (7.6)$$

Kde:

p_n atmosférický tlak [Pa]

r_{vz} měrná plynová konstanta vzduchu 287,1 J/kg·K [32]

T_{out} teplota na výstupu z Trombeho stěny [K]

Objemový průtok ve výstupu z kolektoru Q_v se vypočte ze vztahu (7.7).

$$Q_v = v_{stř} \cdot S \text{ [m}^3\text{/s]} \quad (7.7)$$

Kde:

$v_{stř}$ střední rychlost vzduchu na výstupu z kolektoru [m/s]

S obsah průřezu výstupního otvoru [m²]

7.1.2 VÝPOČET RYCHLOSTI VÝSTUPNÍHO VZDUCHU

Pro správnost celého výpočtu je důležité vypočítat střední rychlost vzduchu na výstupu z kolektoru. Tento výpočet byl proveden metodou stejnoploch [35]. Protože průměr výstupního otvoru je 100 mm, z tab. 5 je patrné, že počet stejnoploch potřebný ke správnému změření je 3.

Tab. 5 Závíslost počtu stejnoploch na průměru vzduchovodu [35]

max. průměr vzduchovodu [mm]	200	600	1000	1400	1400 <
počet stejno ploch	3	4	5	6	7

Dosazením do vzorce (7.8) se vypočítají poloměry, na kterých je potřebné změřit rychlost proudění vzduchu [35].

$$r_i = R \sqrt{\frac{2i-1}{2n}} \text{ [mm]} \quad (7.8)$$

Kde:

r_i poloměr kružnice stejnoplochy [mm]

R poloměr vzduchovodu [mm]

n počet stejnoploch [-]

i počítaná stejnoplocha [-]

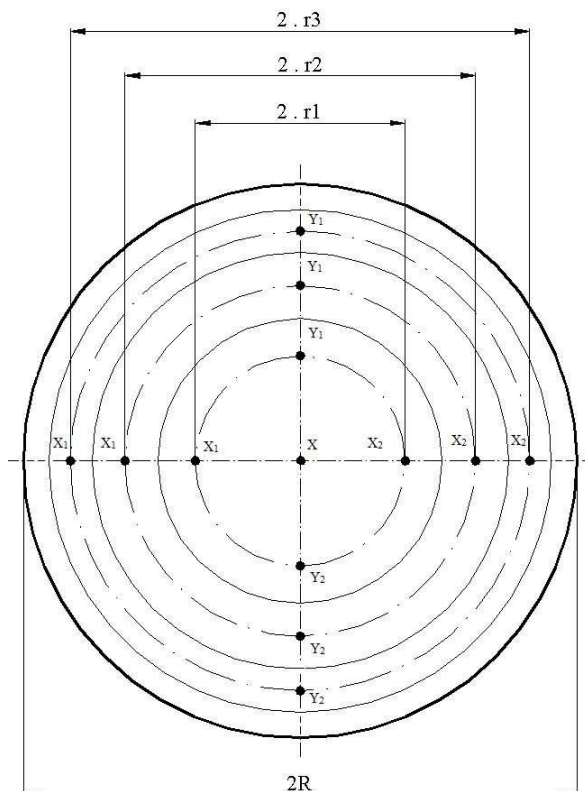
Po dosazení do rovnice (7.8) se vypočítají hledané poloměry.

$$r_1 = 50 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1 - 1}{2 \cdot 3}} = 20,4 \text{ mm}$$

$$r_2 = 50 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 2 - 1}{2 \cdot 3}} = 35,4 \text{ mm}$$

$$r_3 = 50 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 3 - 1}{2 \cdot 3}} = 45,6 \text{ mm}$$

Místa, která byla měřena, jsou vidět na obr. 30. Rychlost vzduchu byla naměřena anemometrem od firmy AHLBORN (obr. 31) při teplotě 46 °C. Průměrná teplota na výstupu z Trombeho stěny za měřené období byla 44,5 °C.



Obr. 30 Měřená místa v průřezu vzduchovodu

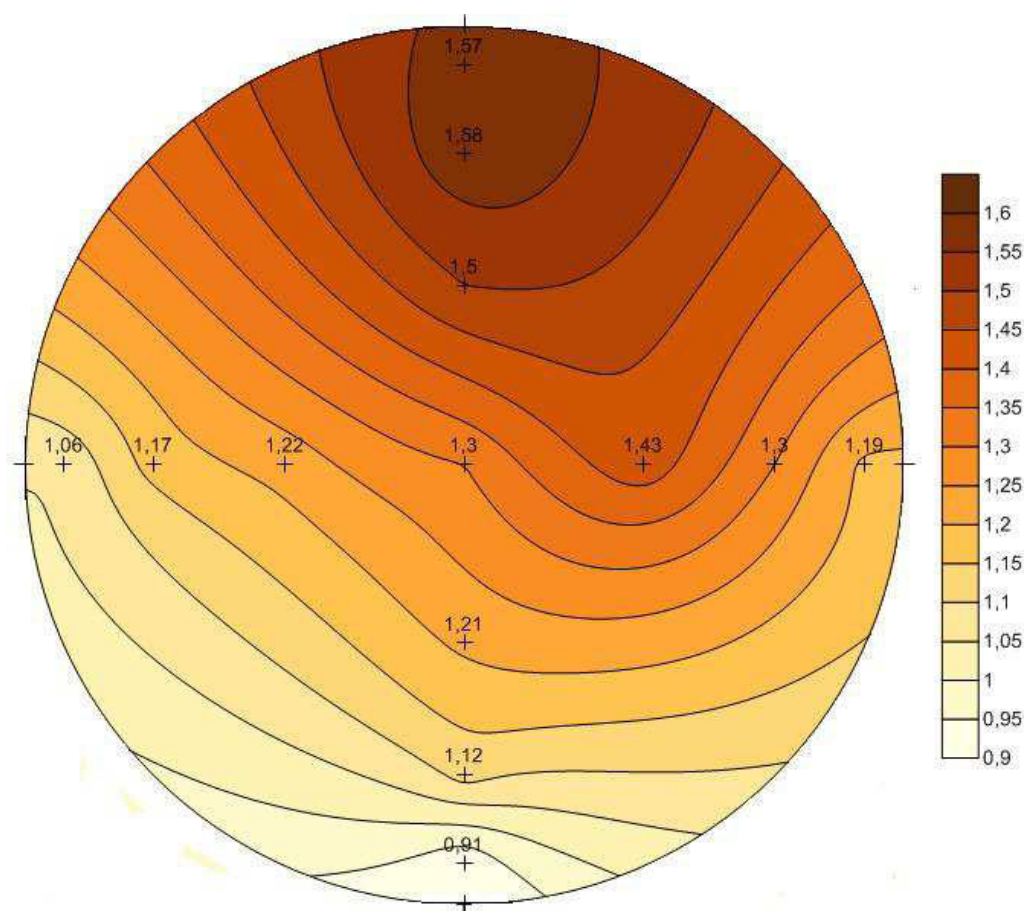


Obr. 31 Anemometr od firmy AHLBORN

Naměřené hodnoty rychlosti vzduchu jsou sepsány v tab. 6. Pomocí programu Surfer od společnosti Golden Software byl zpracován izoliniový diagram rychlosti vzduchu ve vzduchovodu (obr. 32).

Tab. 6 Naměřené hodnoty rychlosti vzduchu [m/s]

	r_1	r_2	r_3	r_0
x_1	1,22	1,17	1,06	1,3
x_2	1,43	1,3	1,19	
y_1	1,5	1,58	1,57	
y_2	1,21	1,12	0,91	



Obr. 32 Izoliniový diagram rychlosti vzduchu ve vzduchovodu

Zprůměrováním naměřených hodnot rychlostí na každé kružnici se získá průměrná hodnota rychlosti každé stejnoplochy (7.9).

$$v_i = \frac{x_1 + x_2 + y_1 + y_2}{4} \text{ [m/s]} \quad (7.9)$$

$$v_1 = 1,34 \text{ m/s}$$

$$v_2 = 1,29 \text{ m/s}$$

$$v_3 = 1,18 \text{ m/s}$$

$$v_0 = 1,3 \text{ m/s}$$

Vypočtením průměru z výše uvedených hodnot (7.10) se získá střední rychlost vzduchu na výstupu z kolektoru $v_{stř}$, která je potřebná k výpočtu objemového průtoku ve výstupu z kolektoru Q_v .

$$v_{stř} = \frac{v_0 + v_1 + v_2 + v_3}{4} \text{ [m/s]} \quad (7.10)$$

$$v_{stř} = 1,279 \text{ m/s}$$

7.1.3 CELKOVÝ ENERGETICKÝ PŘÍNOS

Měřené období bylo pro snazší orientaci v tabulkách rozděleno po dekádách (10 dnů). V tabulkách jednotlivých dekád jsou vypočítány energetické přínosy Trombeho stěny za každý provozní den. Výpočty byly provedeny podle vzorců v kap. 7.1 s tím rozdílem, že vstupní hodnoty t_{in} , t_{out} , m a ρ jsou průměrné hodnoty za celkovou dobu provozu daného dne. Konstantní hodnoty, které jsou dosazovány do vzorců, jsou vidět v tab. 7.

Tab. 7 Konstantní hodnoty dosazované do výpočtů

P_p (ventilátor) [W]	20
Q_v [m ³ /s]	0,01
p_n [Pa]	101325
r [J/kg.K]	287,1
c_p [J/kg.K]	1005

Tab. 8 - 1. březnová dekáda (1. 3. –10. 3.)

datum	čas spuštění	čas vypnutí	provozní doba [hod]	t_{in} [°C]	t_{out} [°C]	Δt [K]	ρ [kg/m ³]	m [kg/s]	Q [W]	Q [kJ]
2.3.	9:23	16:47	7,4	22,20	49,31	27,11	1,094	0,0110	279,5	7447
4.3.	8:44	16:59	8,3	20,73	60,73	40,00	1,057	0,0106	406,8	12081
5.3.	8:29	17:02	8,6	20,51	59,12	38,62	1,062	0,0107	394,0	12128
6.3.	8:26	18:11	9,8	20,68	56,92	36,24	1,069	0,0107	371,1	13027
10.3.	14:08	14:20	0,2	21,78	40,48	18,70	1,125	0,0113	192,4	139
Suma			34,2							44821

Tab. 9 - 2. březnová dekáda (11. 3. –20. 3.)

datum	čas spuštění	čas vypnutí	provozní doba [hod]	t _{in} [°C]	t _{out} [°C]	Δt [K]	ρ [kg/m ³]	m [kg/s]	Q [W]	Q [kJ]
14.3.	12:20	14:41	2,4	18,49	40,53	22,04	1,125	0,0113	230,3	1948
15.3.	12:02	12:29	0,5	18,15	40,87	22,72	1,124	0,0113	237,7	385
16.3.	8:53	16:53	8,0	22,61	39,13	16,51	1,130	0,0114	168,4	4849
17.3.	8:50	16:17	7,5	22,29	55,04	32,75	1,075	0,0108	335,5	8999
18.3.	9:14	9:29	0,3	19,23	40,95	21,72	1,124	0,0113	226,3	204
20.3.	8:32	17:20	8,8	20,38	58,59	38,21	1,064	0,0107	390,3	12365
Suma			27,3							28749

Tab. 10 - 3. březnová dekáda (21. 3. –31. 3.)

datum	čas spuštění	čas vypnutí	provozní doba [hod]	t _{in} [°C]	t _{out} [°C]	Δt [K]	ρ [kg/m ³]	m [kg/s]	Q [W]	Q [kJ]
21.3.	11:47	11:53	0,1	18,60	34,37	15,77	1,148	0,0115	162,6	59
22.3.	11:44	14:17	2,6	20,48	49,70	29,22	1,093	0,0110	302,4	2776
23.3.	10:14	15:59	5,8	23,80	53,53	29,73	1,080	0,0109	304,2	6296
24.3.	8:50	16:15	7,4	22,17	53,42	31,25	1,081	0,0109	320,9	8567
28.3.	13:00	13:15	0,3	17,67	45,38	27,72	1,108	0,0111	290,0	261
29.3.	11:09	14:30	3,4	21,20	43,64	22,44	1,114	0,0112	232,4	2802
30.3.	9:57	15:42	5,8	22,27	49,28	27,01	1,095	0,0110	278,4	5764
Suma			25,2							26525

Tab. 11 - 1. dubnová dekáda (1. 4. –10. 4.)

datum	čas spuštění	čas vypnutí	provozní doba [hod]	t _{in} [°C]	t _{out} [°C]	Δt [K]	ρ [kg/m ³]	m [kg/s]	Q [W]	Q [kJ]
1.4.	9:51	10:06	0,3	21,67	43,05	21,38	1,116	0,0112	220,9	199
	10:45	10:57	0,2	22,04	45,96	23,92	1,106	0,0111	247,0	178
	12:54	13:00	0,1	21,27	39,77	18,50	1,128	0,0113	190,6	69
9.4.	13:30	14:03	0,6	19,00	39,65	20,65	1,128	0,0113	215,2	426
Suma			1,1							871

Tab. 12 - 2. dubnová dekáda (11. 4. –20. 4.)

datum	čas spuštění	čas vypnutí	provozní doba [hod]	t _{in} [°C]	t _{out} [°C]	Δt [K]	ρ [kg/m ³]	m [kg/s]	Q [W]	Q [kJ]
11.4.	14:18	14:33	0,3	20,02	34,40	14,38	1,148	0,0115	146,6	132
12.4.	11:09	11:15	0,1	19,47	34,63	15,17	1,147	0,0115	155,5	56
13.4.	11:03	12:39	1,6	22,09	37,42	15,33	1,136	0,0114	155,9	898
	13:27	15:12	1,8	21,98	43,21	21,23	1,116	0,0112	219,1	1380
14.4.	8:21	12:09	3,8	21,88	40,82	18,94	1,124	0,0113	194,9	2667
	13:00	16:06	3,1	21,71	41,35	19,64	1,122	0,0113	202,5	2260
16.4.	11:42	16:03	4,4	20,63	39,35	18,72	1,129	0,0113	193,4	3028
18.4.	7:57	18:00	10,1	21,62	47,75	26,13	1,100	0,0110	270,1	9772
19.4.	10:21	10:39	0,3	21,56	36,43	14,87	1,140	0,0114	151,1	163
Suma			25,3							20356

Tab. 13 - 3. dubnová dekáda (21. 4. – 30. 4.)

datum	čas spuštění	čas vypnutí	provozní doba [hod]	t _{in} [°C]	t _{out} [°C]	Δt [K]	ρ [kg/m ³]	m [kg/s]	Q [W]	Q [kJ]
21.4.	8:54	17:00	8,1	21,39	49,60	28,21	1,093	0,0110	291,4	8497
23.4.	8:33	15:39	7,1	20,96	41,08	20,12	1,123	0,0113	208,1	5319
24.4.	8:09	17:36	9,5	20,88	50,98	30,10	1,089	0,0109	310,8	10574
25.4.	7:57	17:57	10,0	21,40	52,63	31,23	1,083	0,0109	321,5	11573
26.4.	7:48	18:36	10,8	22,45	51,54	29,09	1,087	0,0109	299,2	11632
27.4.	9:15	9:45	0,5	21,24	37,11	15,87	1,138	0,0114	162,2	292
	10:36	18:03	7,5	22,36	40,04	17,68	1,127	0,0113	181,1	4857
30.4.	9:36	14:48	5,2	20,54	43,23	22,68	1,116	0,0112	235,4	4407
Suma			58,6							57151

Tab. 14 - 1. květnová dekáda (1. 5.–12. 5.)

datum	čas spuštění	čas vypnutí	provozní doba [hod]	t _{in} [°C]	t _{out} [°C]	Δt [K]	ρ [kg/m ³]	m [kg/s]	Q [W]	Q [kJ]
2.5.	13:27	14:30	1,1	19,28	39,35	20,07	1,129	0,0113	208,8	789
5.5.	12:54	16:21	3,5	19,27	43,44	24,16	1,115	0,0112	251,9	3128
6.5.	14:57	15:06	0,2	18,83	36,83	18,00	1,139	0,0114	186,9	101
7.5.	9:48	10:00	0,2	19,48	35,24	15,76	1,144	0,0115	162,0	117
	13:51	16:03	2,2	19,40	40,28	20,88	1,126	0,0113	217,3	1721
8.5.	9:36	10:18	0,7	19,80	39,87	20,07	1,127	0,0113	208,4	525
	10:57	17:48	6,9	20,22	42,92	22,70	1,117	0,0112	235,8	5815
9.5.	9:06	18:27	9,4	21,28	48,77	27,48	1,096	0,0110	284,1	9564
12.5.	9:30	16:21	6,9	21,50	47,90	26,40	1,099	0,0110	272,9	6730
Suma			30,8							28490

Po sumarizaci celkového energetického přínosu za všechny dekády bylo zjištěno, že energetický přínos Trombeho stěny v měřeném období konvekci vzduchu je $Q = 206,96 \text{ MJ}$.

7.2 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Pro získání ekonomického zhodnocení se získaný energetický přínos stěny musí porovnat s různými způsoby vytápění.

7.2.1 ELEKTRICKÁ ENERGIE

Účinnost elektrického přímotopu je téměř 100 %. Proto v případě, že by se vytápělo elektrickým přímotopem, stačí porovnat cenu za elektřinu s energetickým přínosem Trombeho stěny. Cena elektřiny za 1 kWh pro sazbu D45d roku 2013 od Skupiny ČEZ pro přímotopy je 2,74 Kč v nízkém tarifu [39]. Převodem jednotek kilowatthodin na jouly získáme vztah (7.11).

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ} \quad (7.12)$$

Pokud je celkový energetický přínos stěny za měřené období 206,96 MJ, potom jednoduchým výpočtem a využitím vztahu (7.12) vyjde celkové finanční zhodnocení za měřené období.

$$206,96 \text{ MJ} / 3,6 \text{ MJ} = 57,49 \text{ kWh}$$

$$2,74 \text{ Kč/kWh} \cdot 57,49 \text{ kWh} = 157,5 \text{ Kč}$$

Celkový finanční přínos Trombeho stěny v porovnání s elektrickým přímotopným vytápěním je 157,5 Kč za měřené období.

7.2.2 BĚŽNĚ POUŽÍVANÁ PALIVA

Paliva, která se běžně používají na otop, jsou dřevo, uhlí, zemní plyn. Potřebné informace pro výpočet finančního zhodnocení jsou v tab. 15.

Tab. 15 *Výhřevnosti a ceny jednotlivých paliv, účinnosti běžně používaných kotlů [37]*

Palivo	Průměrná výhřevnost paliva	Průměrná cena paliva k 1. 5. 2012	Průměrná účinnost a druh použitého kotle
Kusové dřevo	14,8 MJ/kg	2,6 Kč/kg	Klasický kotel s účinností 65%
Hnědé uhlí	18 MJ/kg	2,8 Kč/kg	Klasický kotel s účinností 65%
Zemní plyn	33,7 MJ/m ³	16,18 Kč/m ³	Klasický kotel s účinností 90%
Propan-Butan	46 MJ/kg	24 Kč/kg	90%

Pokud se opět porovná energetický přínos stěny s cenou a výhřevností paliva, jednoduchým výpočtem se zjistí celkové finanční zhodnocení pro dané palivo. Níže je ukázán výpočet pro vytápění dřevem.

$$14,8 \text{ MJ} \cdot 0,65 \% = 9,62 \text{ MJ}$$

$$206,96 \text{ MJ} / 9,62 \text{ MJ/kg} = 21,51 \text{ kg}$$

$$21,51 \text{ kg} \cdot 2,6 \text{ Kč/kg} = 55,9 \text{ Kč}$$

Obdobným způsobem byla dopočítána finanční zhodnocení pro další paliva.

Hnědé uhlí	49,5 Kč
------------	---------

Zemní plyn	110,4 Kč
------------	----------

Propan-butan	120 Kč
--------------	--------

8 DISKUZE

Naměřenými a vypočtenými hodnotami se došlo k následujícím závěrům.

Za dobu měření od 25. 2. 2013 do 12. 5. 2013 byla z celkového počtu 77 dní Trombeho stěna v provozu 41 dní. Z celkového počtu dní se jedná o 57 %. Na této hodnotě se negativně odrazilo mnoho faktorů. Za prvé se zde projevil až nezvykle chladný konec jara roku 2013 [38], který je vidět například na grafech v první dubnové dekádě. Druhým důvodem je odpojení dodávky elektrického proudu v určitých dnech v dubnu. Tyto dny byly dostatečně slunečné, aby Trombeho stěna fungovala, ale nemohly být započteny do celkového energetického ani finančního přínosu. Kdyby nedošlo k výše zmíněným problémům, mohla by se procentuální hodnota slunečných dnů v naměřeném období pohybovat okolo 65-70 %, a tím by se navýšil i celkový energetický přínos. Tento přínos by se také navýšil, pokud by bylo do tepelného výkonu stěny zahrnuto teplo dodané obytným prostorám pomocí kondukce skrze stěnu domu a následné radiace do místnosti.

Během měřeného období bylo také zaznamenáno snížení tepelného výkonu, které bylo způsobeno změnou úhlu, pod kterým dopadají sluneční paprsky na kolektor. V prvním březnovém týdnu dosahovaly maximální teploty na výstupu z Trombeho stěny téměř 80 °C, zatímco v dubnu se maximální teploty blížily pouze 70 °C. Výkon Trombeho stěny za slunečného zimního dne je tedy vyšší vzhledem k poloze slunce na obloze.

Z naměřených dat je možné pokusit se velmi přibližně odhadnout celkový energetický přínos Trombeho stěny za celou otopnou sezónu a následně velmi hrubě dopočítat dobu návratnosti původní investice. Otopná sezóna začíná od 1. září a končí 31. května a jedná se o 273 dní [40]. Z měření Trombeho stěny bylo spočítáno, že pro 77 dnů je celkový energetický přínos 206,96 MJ. Odečtením zimního období od celkových 273 dní je získán celkový počet jarních a podzimních dnů, který činí 183. Za předpokladu, že je podzim brán jako ekvivalentní období pro jaro, je jednoduchým výpočtem převeden celkový energetický přínos za měřených 77 dní na 183 dní.

$$206,96 \text{ MJ} / 77 \text{ dnů} = 2,69 \text{ MJ/den}$$

$$2,69 \text{ MJ/den} \cdot 183 \text{ dní} = 491 \text{ MJ}$$

Protože nejsou k dispozici žádná data z měsíců prosince a ledna, je důležité odhadnout energetický přínos za zimní období. Na stránce [41] je napsáno, že letošní zima byla z hlediska slunečních dní velmi chudá. Zimu 2012-2013 bylo naměřeno pouze 12 slunečných dní. Za průměrný slunečný den stěna vyprodukuje 4,31 MJ. Výpočet energetického přínosu za zimní období je následující.

$$4,31 \text{ MJ/slun. den} \cdot 12 \text{ dnů} = 51,72 \text{ MJ}$$

Po sumarizaci výše uvedených hodnot je velmi přibližný energetický přínos Trombeho stěny za celou otopnou sezónu 542,72 MJ. Porovnáním s vytápěním elektrickým přímotopem a využitím vzorců v kapitole 7.2.1 je vypočítána celková finanční návratnost 413,1 Kč za celou topnou sezónu. Jestliže je původní investice do Trombeho stěny zhruba 4500 Kč, návratnost investice v rocích se dopočítá jednoduchým výpočtem.

$$4500 \text{ Kč} / 413,1 \text{ Kč/rok} = 10,89 \text{ roků}$$

Původní investice by se měla velmi přibližně vrátit za zhruba 11 let. Tento výpočet, jak již bylo zmíněno výše, je dosti nepřesný z důvodů nedostatku naměřených dat a nezahrnutí vlivu kondukce a radiace.

ZÁVĚR

Cílem této závěrečné práce bylo popsat, změřit a posoudit energetický a finanční přínos konkrétní, svépomocí postavené Trombeho stěny. Během měřeného období, které trvalo 77 dní, byla Trombeho stěna v provozu 41 dní. Energetický přínos stěny byl za tuto dobu 206,96 MJ. Po srovnání s různými druhy způsobů vytápění bylo zjištěno, že největší úspory dosáhne tato Trombeho stěna v porovnání s elektrickým vytápěním přímotopem 157,5 Kč. Naopak pokud je na vytápění využito topné dřevo, je úspora pouze 55,9 Kč za měřené období. Tyto hodnoty byly ovlivněny mnoha negativními faktory, které se projeví snížením celkového finančního přínosu měřené Trombeho stěny. Největší nepřesnost ve výpočtu byla způsobena nedostatkem naměřených dat, podle kterých by bylo možné dopočítat energetický přínos kondukcí tepla stěnou domu a následnou radiací do obytného prostoru. Tento způsob přenosu tepla nebyl ve výpočtu zohledněn.

Rodinný dům, na kterém se Trombeho stěna nachází, je vytápěn elektřinou s možností přitápění dřevem v krbových kamnech. Jelikož se kamna nachází ve stejné místnosti, kde ústí výstupní otvor Trombeho stěny, je pro danou domácnost využití Trombeho stěny vzhledem k návratnosti celkové investice nevýhodné. Výhodnějším řešením je prosté přitopení v kamnech. Pro domácnosti, které jako hlavní zdroj vytápění využívají elektrické přímotopy, může být užití Trombeho stěny zajímavým řešením. Návratnost investice je ovlivněna vstupními náklady na pořízení stěny. V případě realizace Trombeho stěny dodavatelskou firmou na již postaveném rodinném domě jsou náklady na pořízení relativně vysoké. Toto má za následek prodloužení návratnosti vstupní investice. Jiná situace může nastat v okamžiku, kdy je s Trombeho stěnou již počítáno v projektu nově vznikajícího rodinného domu.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] TVERBERG, Gail. World Energy Consumption. Our Finite World [online]. 12.3.2012 [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: <<http://ourfiniteworld.com/2012/03/12/world-energy-consumption-since-1820-in-charts/>>
- [2] MURTINGER, Karel - TRUXA, Jan. *Solární energie pro váš dům*. 1.vyd. Brno: ERA group spol. s r.o., 2005 991 s. ISBN 80-7366-029-6
- [3] Solární konstanta. Converter [online]. © 2002 [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: <<http://www.converter.cz/jednotky/solarni-konstanta.htm>>
- [4] Vládní podpora fotovoltaiky. Solartec [online]. © 2012 [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: <<http://www.solartec.cz/male-instalace-do-30kwp/informace-o-fotovoltaice/vladni-podpora-fotovoltaiky>>
- [5] Solární elektrárny v ČR. *Fotovoltaické elektrárny: Ekologický a obnovitelný zdroj elektrické energie* [online]. © 2013 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <<http://www.fotovoltaicke-clanky.cz/solarni-elektrarny-v-cr/>>
- [6] LANGHAMMER. *Pasivní systémy pro přitápění rodinného domku*. Plzeň, 2009. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky a ekologie.
- [7] Passive Solar Simplified: Easily design a truly green home for Colorado and the West. Boulder: Alitheia Press, 2012. ISBN 978-1452856575.
- [8] *Trombeho stěna: Nejjednodušší využití solární energie* [online]. © 2009 [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: <<http://www.envic-sdruzeni.cz/upload/trombeho-stena-brozura-nahled.pdf>>
- [9] Passive Solar Systems and Thermal Storage walls (Trombe – Michel) in particular [online]. 2008 [cit. 2013-04-07]. Dostupné z: <http://www.ecoarchitects.gr/research_docs/1171236197.pdf>
- [10] Development and validation of the unvented Trombe wall model in energyplus [online]. Urbana, 2003 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <[http://www.amet-me.mnsu.edu/UserFilesShared/SolarWall/Solar%20Passive%20\(Trombe\)%20Wall%20Documents/Technical%20Publications/DEVELOPMENT%20AND%20VALIDATION%20OF%20THE%20UNVENTED%20TROMBE%20WALL.pdf](http://www.amet-me.mnsu.edu/UserFilesShared/SolarWall/Solar%20Passive%20(Trombe)%20Wall%20Documents/Technical%20Publications/DEVELOPMENT%20AND%20VALIDATION%20OF%20THE%20UNVENTED%20TROMBE%20WALL.pdf)> Diplomová práce. University of Illinois.
- [11] TORCELLINI, P. a S. PLESS. Trombe Walls in Low-Energy Buildings: Practical Experiences. In: World Renewable Energy Congress VIII and Expo [online]. Denver, 2004 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <<http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/36277.pdf>>
- [12] FILLEUX, Charles. *Solární teplovzdušné vytápění: koncepce, technika, projektování*. 1. české vyd. Ostrava: HEL, 2006, 175 s. ISBN 80-861-6728-3.

- [13] Trombeho stěna: vyhodnocení efektivity v diplomové práci. Envic [online]. 2009 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: <<http://www.envic-sdruzeni.cz/aktuality/aktuality-obsah/trombeho-stena-vyhodnoceni-efektivita-v-diplomove-praci.htm>>
- [14] Trombeho stěna: Základní informace. Envic [online]. 2009 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: <<http://www.envic-sdruzeni.cz/aktuality/aktuality-obsah/trombeho-stena-zakladni-informace.htm>>
- [15] Teplota a její měření. *Informace studentům: Katedra fyziky PřF OU* [online]. 2005 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://artemis.osu.cz:8080/artemis/uploaded/199_3_3%20Teplota_mereni.pdf>
- [16] LÖWINGER, Lukáš a Tomáš VESELÝ. *Digitální teploměr* [online]. Praha, 2011 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <<http://www1.fs.cvut.cz/stretech/2011/sbornik/144.pdf>>. Maturitní práce. Střední průmyslová škola sdělovací techniky. Vedoucí práce Ing. Jan Tuček, CSc.
- [17] Způsoby měření teploty. Oko [online]. 2007 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <<http://oko.yin.cz/35/zpusoby-mereni-teploty/>>
- [18] STRÍTESKÁ, Renata. *Moderní metody měření teploty* [online]. Brno, 2010 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: <http://is.muni.cz/th/175140/prif_m/TISK1.txt>. Diplomová práce. Masarykova univerzita v Brně, Přírodovědecká fakulta.
- [19] ŠPRINGL, Vít. Měření teploty: polovodičové odporové senzory teploty. HW.cz [online]. 19.8.2004 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: <<http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>>
- [20] BRZOBOHATÝ Lukáš: *Měření teploty*. Brno, 2011. 19s., CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.
- [21] CIBULKA, Ivan, Lubomír HNĚDKOVSKÝ a Vladimír HYNEK. *Základní fyzikálně-chemické veličiny a jejich měření* [online]. Praha, 2006 [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/fch/cz/pomucky/FCHV_all_7.pdf>. Učební text. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Ústav fyzikální chemie.
- [22] Plechy pozinkované. Kondor [online]. 2012 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <<http://www.kondor.cz/plechy-pozink/>>
- [23] Nátěr ETERNAL. *Saviva.cz: stavebniny na síti!* [online]. © 2012 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <<http://shop.staviva.cz/shop/product/nater-eternal-mat-akryl013-cerna-07kg-austis/>>

- [24] Hranoly na krovy, dřevěné trámy: ceník. *Štimák s.r.o.* [online]. © 2010 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <<http://www.rezivo.cz/hranoly-krovy-tramy.php>>
- [25] Ventilátory SIKU. Gienger Granit [online]. © 2009, poslední aktualizace 30.3.2013 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <<http://www.granitpresov.sk/eshop/1984>>
- [26] TER-3B. Elko EP [online]. © 2010 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <<http://eshop.elkoep.cz/ter-3b-----detail-OA00000101.aspx>>
- [27] LSN 6B. *ELIMA: elektroinstalační materiál* [online]. © 2006-2013 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.elima.cz/obchod/lsn-6b_3-p-9919.html>
- [28] Komůrkové rovné polykarbonátové desky. *Levné polykarbonáty* [online]. © 2009 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <<http://www.levnepolykarbonaty.cz/katalog/nabidka-e-shopu--/komurkove-rovne-polykarbonatove-desky-makrolon---montazni-prislusenstvi/objednat-komurkove-desky-makrolon--tl.-10-mm--pc-2-/komurkove-desky--hobby--tl.-10-mm--pc-2--cira-clear->>>
- [29] Termočlánky. Telemeter [online]. 2010 [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <<http://www.telemeter.info/documents/termoclanky.pdf>>
- [30] Přehled termočlánků. *České vysoké učení technické v Praze: Fakulta strojní* [online]. 2008, 09.04.2013 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <<http://www1.fs.cvut.cz/cz/U12110/TEM/senzory/prehled-termoclanku.pdf>>
- [31] Testo 177-T4. Testo [online]. © 2011 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <[http://www.testo.us/online/abaxx-?\\$part=PORTAL.USA.Applications&\\$event=show-from-content&externalid=opencms:/Products/MeasurementParameters/temperature/Messgeraete/Datenlogger/testo_177-T4/USEnglisch.product](http://www.testo.us/online/abaxx-?$part=PORTAL.USA.Applications&$event=show-from-content&externalid=opencms:/Products/MeasurementParameters/temperature/Messgeraete/Datenlogger/testo_177-T4/USEnglisch.product)>
- [32] PAVELEK, Milan. Termomechanika. Vyd. 3. přeprac. /. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 284 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-2409-5.
- [33] Air properties. The Engineering ToolBox [online]. 2006 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html>
- [34] Atmosférický tlak. Fyzmatik [online]. 2009, 27.5.2009 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <<http://fyzmatik.pise.cz/903-atmosfericky-tlak.html>>
- [35] Měření závislosti celkového tlaku ventilátoru na průtoku. In: *Laboratorní cvičení* [online]. 2010 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z:

<https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fusers.fs.cvut.cz%2F~schwajan%2Fschwarzer_soubory%2FSoubory%2FLaborky_ventilator%2Fventilator.doc&ei=M2eXUfTZIILgOtG0gMAE&usg=AFQjCNGgBJ3oKQdCXNXZRjRnpXsHTBiD4Q&sig2=_LM65-cNVL1Kf3q_-ekwnw&cad=rja>

[36] Cena za 1 kWh elektřiny. *Výpočet elektřiny 2013* [online]. 2013 [cit. 2013-05-16].
Dostupné z: <http://vypocetelektriny.cz/cena-za-kwh-elektriny/>

[37] Paliva a energie. Atmos [online]. 2012 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z:
<<http://www.atmos.cz/czech/paliva-energie>>

[38] Nastalo astronomické jaro, počasí ale zůstává zimní. Lidovky.cz [online]. 2013 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.lidovky.cz/prichazi-astronomicke-jaro-pocasi-ale-bude-jeste-zimni-plv-zpravy-domov.aspx?c=A130320_084350_ln_domov_pv>

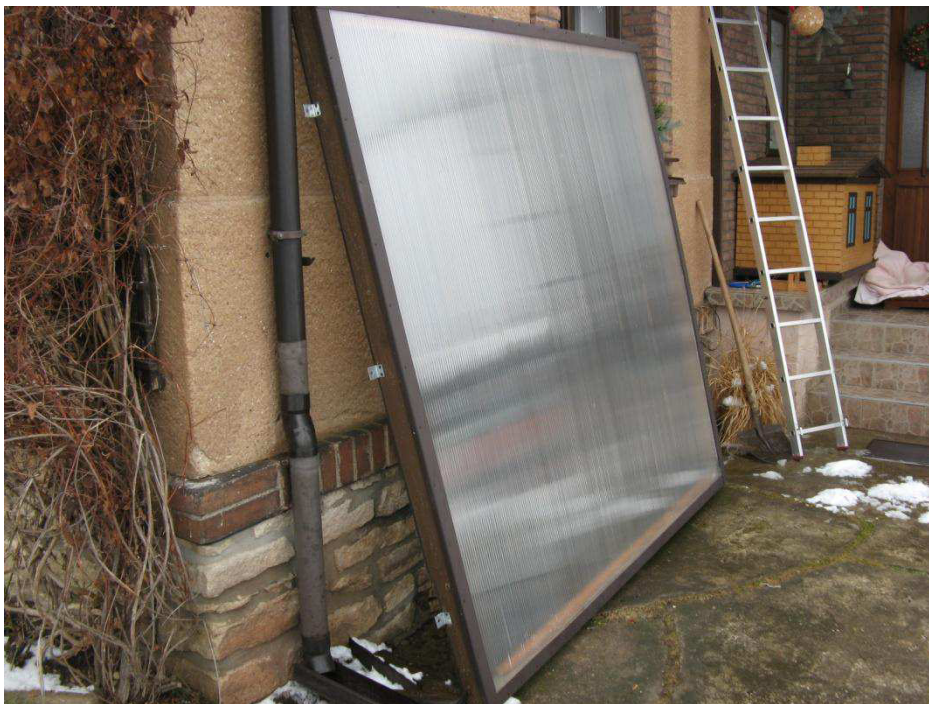
[39] D přímotop. *Skupina ČEZ* [online]. 2013 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z:
<<http://www.cez.cz/cs/pro-zakazniky/elektrina/ceny/2013/domacnost/comfort/d-primotop.html>>

[40] Začátek topné sezóny. *Technická zařízení budov* [online]. 2009 [cit. 2013-05-18].
Dostupné z: <<http://tzbvalmez.cz/?q=zacatek-topne-sezony>>

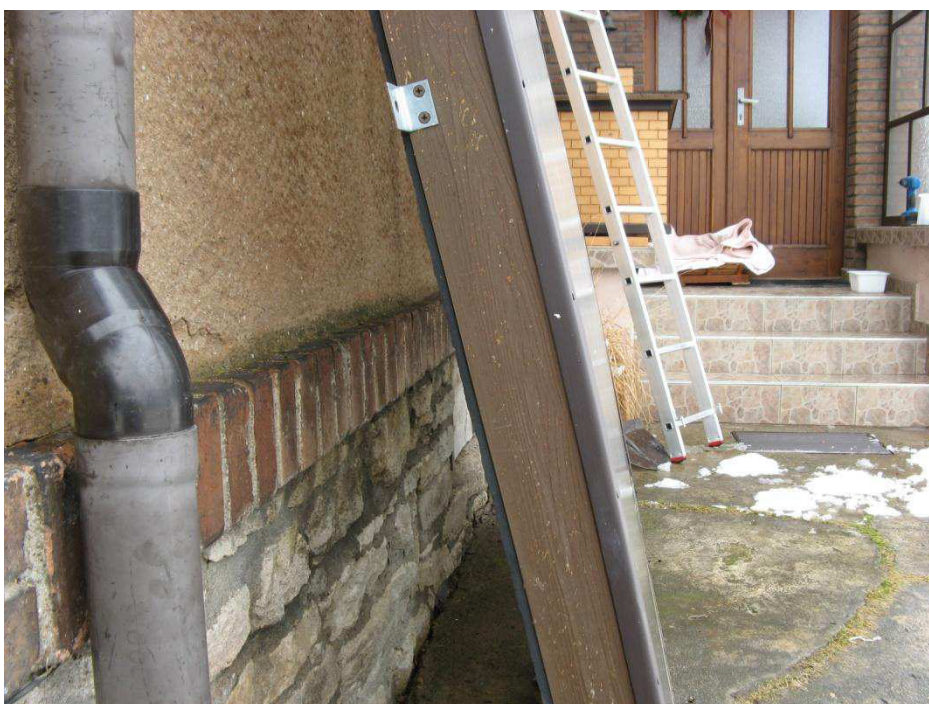
[41] Zima 2012/2013. Hydrokliment [online]. 2013 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z:
<http://meteo_tom-791.blogy.in-pocasi.eu/Zima_20122013-1363869329.html>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 - odejmutá Trombeho stěna



Příloha 2 - detailní pohled na rám



*Příloha 3 - pohled na vstupní a výstupní otvor
Trombeho stěny*



Příloha 4 - pohled na vstupní otvor, ventilátor a termostat



Příloha 5 - přetlaková klapka, pohled z venku



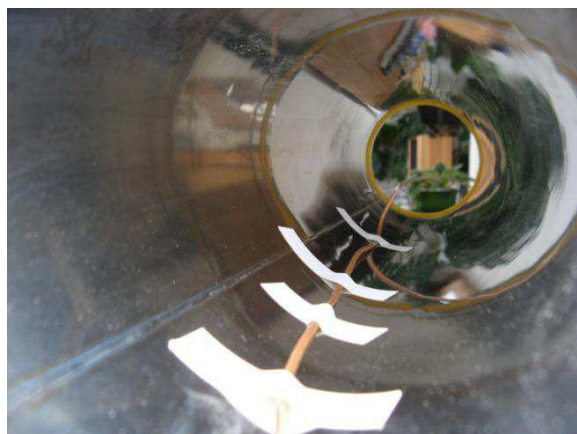
Příloha 6 - umístění senzoru č. 2



Příloha 7 - vstupní otvor, pohled z venku



Příloha 8 - umístění senzoru č. 1



Příloha 5 - umístění senzoru č. 3 v blízkosti čidla termostatu

